

32/446(131) 2<sup>e</sup> l<sup>e</sup>

ERKENNEN  
STANHOUDING

**Validatie van gesimuleerde verdampingsreducties met remote sensing in Mander**

**A.A. Hooijer  
M.J. Verbeek**

**Rapport 131**

**DLO-STARING CENTRUM, Wageningen, 1991**



06 JUN 1991

18n 546045

## REFERAAT

Hooijer, A.A. & M.J. Verbeek, 1991. *Validatie van gesimuleerde verdampingsreducties met remote sensing in Mander*.

Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 131.

94 blz.; 24 fig.; 11 tab.; 12 aanh.

De bodemkaart van het onderzoeksgebied Mander, 400 hectare groot, in het noordoosten van de provincie Overijssel, is omgezet in een kaart met bodemfysische eenheden. De bodemfysische eenheid gecombineerd met gegevens over de grondwaterstand en de meteorologie is gebruikt om met het hydrologisch model MUST de verdampingsreducties te berekenen. Tevens zijn op 25 mei, 19 juni en 29 juli 1989 luchtfoto's opgenomen van het onderzoeksgebied met een thermische videocamera. Deze beelden zijn ook omgezet naar verdampingsreducties.

De verdampingsreducties berekend met het model MUST en de verdampingsreducties afgeleid uit de thermische videobeelden zijn met elkaar vergeleken. Het blijkt dat de beide verdampingsreducties voor 29 juli goed overeenkomen. Voor 25 mei en 19 juni zijn de uitkomsten minder eenduidig. De oorzaken van een goede of niet eenduidige overeenkomst in de beide verdampingsreducties worden besproken.

Trefwoorden: onderzoeksgebied Mander, bodemfysische eenheden, simulatiemodel MUST, verdampingsreducties, remote sensing, thermische video.

ISSN 0924-3070

©1991

DLO-STARING CENTRUM Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied

Postbus 125, 6700 AC Wageningen

Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

Het DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

Het DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het DLO-Staring Centrum.

Project 365

## INHOUD

	blz.
WOORD VOORAF	9
SAMENVATTING	11
1 INLEIDING	15
1.1 Doel van het onderzoek	15
1.2 Achtergrond	15
1.3 Werkwijze	16
1.4 Structuur van het rapport	16
2 ONDERZOEKSGBIED	19
3 BEREKENING VAN VERDAMPINGSREDUCTIES MET HET HYDROLOGISCH MODEL MUST	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Invoergegevens	22
3.2.1 Bodemkundige gegevens	24
3.2.1.1 Effectieve wortelzone	24
3.2.1.2 Opbouw van de ondergrond	25
3.2.2 Hydrologische gegevens	25
3.2.2.1 Onderrandvoorwaarde	25
3.2.2.2 Bovenrandvoorwaarde	26
3.2.3 Gewasgegevens	27
3.3 Berekende verdampingsreducties	27
4 BEREKENING VAN VERDAMPINGSREDUCTIES UIT THERMISCHE VIDEOBEELDEN	29
4.1 Inleiding	29
4.2 Benodigde gegevens	29
4.2.1 Vluchtgegevens	29
4.2.2 Veldgegevens	30
4.3 Verwerking van de gegevens	30
4.3.1 Selectie en digitalisatie	32
4.3.2 Geometrische correctie	32
4.3.3 Geografische oriëntatie	34
4.3.4 Omrekenen van digitale waarden naar werkelijke temperaturen	34
4.3.5 Bepaling van de verdampingsreducties	35
4.4 Berekende verdampingsreducties	38
5 VALIDATIE VAN GESIMULEERDE VERDAMPINGSREDUCTIES MET REMOTE SENSING	41
5.1 Mogelijke oorzaken van verschil in verdampingsreducties	41
5.2 Validatie criteria	42
5.3 Bespreking van de resultaten	48
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	49
6.1 Conclusies	49
6.2 Aanbevelingen	49
LITERATUUR	51

## FIGUREN

1 Schematische weergave van de structuur van het onderzoek	17
2 Het gebied van de waterwinningen Manderveen en Manderheide met daarin het onderzoeksgebied Mander	20
3 Vlakkenkaart van het onderzoeksgebied Mander	22
4 Bodemkaart van het onderzoeksgebied Mander	23
5 Grondwatertrappenkaart van het onderzoeksgebied Mander	23
6 De cumulatieve neerslaghoeveelheid en de cumulatieve potentiële verdamping uitgezet voor dag 110 tot en met dag 220	26
7 Verdampingsreducties berekend op 25 mei, 19 juni en 29 juli met het hydrologisch model MUST	28
8 Gebieden in het onderzoeksgebied Mander die gefilmd zijn op de verschillende vluchtdagen	31
9 Ligging van de graspercelen met een bedekkingsgraad groter dan 90 procent en alle maispercelen voor de drie vluchtdagen	33
10 Verdampingsreducties berekend op 25 mei, 19 juni en 29 juli met remote sensing-beelden	39
11 De gemiddelde verdampingsreductie per kaartvlak voor de remote sensing-opname met daarnaast de bijbehorende standaardafwijking	43
12 Het absolute verschil in verdampingsreducties tussen de MUST en de remote sensing-berekening	45
13 Kaartvlakken die wel of niet voldoen aan het gestelde criterium van maximaal twee verdampingsklassen verschil voor de drie vluchtdagen	47
14 Invoerfile voor de berekening van de verdampingsreducties met MUST voor een met gras begroeid perceel	55
15 Invoerfile voor de berekening van de verdampingsreductie met MUST voor een met maïs begroeid perceel	56
16 Schematische weergave van het ARC/INFO-pakket	63
17 Verklaring van de binnen ARC/INFO gebruikte verschillende benamingen	64
18 Thermisch beeld gedigitaliseerd met het AGA-systeem	69
19 Het selecteren van gedigitaliseerde thermische videobeelden met het programma DISCO	70
20 Schematisch overzicht van de indeling van het ERDAS-systeem met zijn modules en submodules	72
21 Regressielijn bepaald door de pixelwaarde van het thermisch beeld uit te zetten tegen de gemiddelde temperaturen in het veld in mei	78
22 Regressielijn bepaald door de pixelwaarde van het thermisch beeld uit te zetten tegen de gemiddelde temperaturen in het veld in juni	78
23 Regressielijn bepaald door de pixelwaarde van het thermisch beeld uit te zetten tegen de gemiddelde temperaturen in het veld in juli	79
24 Een voorbeeld van een programma binnen GISMO voor de berekening van de verdampingsreducties voor de maand juli	90

## TABELLEN

1 Waarden voor de regressiecoëfficiënten voor de omrekening van digitale waarden naar gewastemperaturen	34
2 Waarden voor de coëfficiënten voor verschillende gewastypen en -hoogten	37
3 Berekende waarden voor de windsnelheid op twee meter hoogte en de empirische coëfficiënt bij gras en maïs op de drie vluchtdagen	37
4 De waarden voor de referentietemperatuur van de verschillende gewassen voor de drie vluchtdagen	38
5 Vergelijking van verdampingsreducties per kaartvlak voor de bodemeenheden op de vluchtdagen	44
6 Vergelijking van de verdampingsreducties per kaartvlak voor de bodemsoorten op de vluchtdagen	44
7 Vergelijking van de verdampingsreducties per kaartvlak voor de grondwatertrappen op de vluchtdagen	46
8 Vergelijking van de verdampingsreducties aan de hand van de gewassenkaart op de vluchtdagen	46
9 Berekende verdampingsreducties voor gras en maïs voor, op en na de vluchtdag per kaartvlak	59
10 De gewasfactoren van gras en maïs per decade per maand behorende bij de referentie-gewasverdamping	83
11 Bepaling van de potentiële windsnelheid, de correctiefactor en de windsnelheid op 2 meter boven de nulvlaksverplaatsing uit de gemeten windsnelheid op 10 meter hoogte	87

## AANHANGSELS

1 Beschrijving van een invoerfile voor MUST	55
2 Verdampingsreducties berekend met MUST	59
3 Verwerken van veldgegevens met ARC/INFO	63
4 Omzetten van ARC/INFO-files naar ERDAS-files	67
5 Het digitaliseren van thermische videobeelden en de omzetting naar ERDAS	69
6 Het omzetten en geometrisch corrigeren van warmtebeelden vanuit het AGA-systeem binnen ERDAS	71
7 Bepaling van de relatie tussen de gemeten temperaturen in het veld en de temperaturen van het thermisch beeld	77
8 Toelichting bij gebruikte potentiële gewasverdampingswaarden	81
9 Het schatten van de windsnelheid boven het gewas	85
10 ERDAS programma's ANNOTAT, BSTATS, COLORMOD en GISMO	89
11 Datafiles	91
12 Computerprogramma's	93

## WOORD VOORAF

De studie naar de validatie van gesimuleerde verdampingsreducties met remote sensing in Mander werd mede mogelijk gemaakt door financiële ondersteuning door de Beleidscommissie Remote Sensing.

De studie is van september 1990 tot januari 1991 uitgevoerd voor een afstudeervak van vier maanden voor de vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouw Universiteit te Wageningen.

Dr. ir. J.H.M. Wösten, ir. G.J.A. Nieuwenhuis en ir. H.A.M. Thunnissen (allen DLO-Staring Centrum) en dr. M.A. Mulders (LUW) zorgden voor de begeleiding van het onderzoek.

## SAMENVATTING

Verdampingsreducties kunnen berekend worden met hydrologische modellen. Deze modellen simuleren de waterbeweging in het onverzadigde deel van de bodem. De grondwaterspiegel is de onderrand van de onverzadigde zone, terwijl de bovenrandvoorwaarde van de onverzadigde zone gevormd wordt door het bodemoppervlak, waarop het weer zijn invloed uitoefent. Voor deze hydrologische modellen is een uitgebreide beschrijving van de bodem nodig.

In dit onderzoek naar de validatie van gesimuleerde verdampingsreducties met remote sensing in Mander wordt de bodemkaart (schaal 1 : 10 000) gecombineerd met de grondwatertrappenkaart (schaal 1 : 10 000) tot kaartvlakken. Voor ieder kaartvlak zijn de volgende gegevens geïnventariseerd en gegeneraliseerd:

- voor alle lagen binnen één kaartvlak zijn de doorlatendheidskarakteristieken en waterretentiecurven bepaald;
- de effectieve wortelzone van het gewas dat het beschreven kaartvlak begroeit is vastgesteld;
- het grondwaterstandsverloop per kaartvlak in de tijd.

Met de oorspronkelijke bodemkaart, de grondwatertrappenkaart en deze extra gegevens zijn kaartvlakken geproduceerd die uniform zijn naar verdampingskarakteristieken.

Een andere methode om verdampingsreducties te bepalen is deze af te leiden uit remote sensing-beelden. Met eenvoudige relaties blijkt het mogelijk te zijn uit remote sensing-opnamen in het thermisch gebied van het elektromagnetisch spectrum, 8-14  $\mu\text{m}$ , verdampingsreducties te bepalen.

In dit onderzoek is gekeken naar de relatie tussen verdampingsreducties berekend met een hydrologisch model en verdampingsreducties berekend met remote sensing in Mander. De berekende verdampingsreducties kunnen op deze manier gevalideerd worden.

Als onderzoeksgebied is het gebied Mander gekozen. Dit gebied van 400 hectare maakt deel uit van de waterwinningen Manderveen en Manderheide en ligt in zijn geheel in de gemeente Tubbergen. In 1984 en 1985 heeft STIBOKA een uitgebreide bodemkundig-hydrologische inventarisatie in dit gebied uitgevoerd. De verzamelde gegevens zijn in dit onderzoek gebruikt. Het hydrologisch model MUST is gebruikt voor de berekening van de verdampingsreducties per kaartvlak.

In 1989 zijn op 25 mei, 19 juni en 29 juli vluchten uitgevoerd boven dit gebied. Tijdens deze vluchten zijn luchtfoto's gemaakt en opnamen met een thermische video-camera. Deze opnamen zijn relatief goedkoop, zodat meer vluchten in één jaar gemaakt kunnen worden, waardoor temporele verschillen aan te tonen zijn. Gelijktijdig met de vluchten zijn in het veld de gewassoort, gewashoogte, bedekkingsgraad en eventuele beregening geïnventariseerd. Tevens zijn stralingstemperaturen gemeten van het gewas, omdat hiermee een relatie gelegd kan worden tussen de pixelwaarden die geregistreerd worden met de thermische video-apparatuur en de gemeten stralingstemperaturen van het gewas in het veld. Om

thermische videobeelden tot verdampingsreductiebeelden om te zetten zijn de volgende bewerkingen uitgevoerd:

- selectie en digitalisatie;
- geometrische correctie;
- geografische oriëntatie;
- omrekenen digitale waarden naar werkelijke temperaturen;
- berekenen van verdampingsreducties.

Bij de berekening van verdampingsreducties met remote sensing is het belangrijk te weten:

- welk gewas op welk perceel staat;
- wat de hoogte is van het gewas;
- wat de bedekkingsgraad is;
- of een perceel al of niet berekend wordt.

In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar percelen die voor meer dan 90 procent bedekt zijn en niet berekend worden. Een bodem die voor minder dan 90 procent bedekt is, gaat de onbedektheid van die bodem een te belangrijke rol spelen en de berekende verdampingsreducties zullen de werkelijke verdampingsreducties overschatten. Als een perceel berekend wordt, verdampt het gewas potentieel terwijl hier in het hydrologisch model geen rekening mee wordt gehouden (de watergift is niet bekend).

Voor de verwerking van de thermische videobeelden zijn gebruikt het bij de AGA-apparatuur behorende beeldverwerkingspakket en het remote sensing-beeldverwerkingspakket ERDAS. Het GIS-pakket ARC/INFO is gebruikt om de verschillende kaarten te digitaliseren en de veldinventarisaties digitaal op te slaan.

Vervolgens zijn de verdampingsreducties berekend met MUST en de verdampingsreducties berekend met remote sensing, met elkaar vergeleken. Dit is niet eenvoudig, omdat de verdampingsreducties op een verschillende schaal berekend zijn. Met het hydrologisch model zijn verdampingsreducties per kaartvlak berekend en met de thermische video-opnamen zijn verdampingsreducties berekend per pixel. Met het programma OBDREN, ontwikkeld op het DLO-Staring Centrum, zijn de remote sensing-waarden vereffend per kaartvlak.

Nu is het mogelijk de verdampingsreducties berekend met MUST en de verdampingsreducties berekend met remote sensing met elkaar te vergelijken. Voor ieder kaartvlak is het absolute verschil berekend tussen de beide waarden. Een verschil van maximaal 2 verdampingsklassen wordt acceptabel geacht (1 verdampingsklasse beslaat 10 procent). Voor alle drie de vluchtdagen zijn de absolute verschillen bepaald.

Aan de hand van de bepaalde verschillen is de validatie uitgevoerd. De validatie is uitgevoerd per:

- bodemeenheid: verzameling van kaartvlakken met dezelfde combinatie bodemsoort en grondwatertrap;
- bodemsoort voorkomend op de bodemkaart 1 : 10 000;
- grondwatertrap voorkomend op de grondwatertrappenkaart 1 : 10 000;
- gewassoort.



Wanneer binnen een kaartvlak een deel van een geselecteerd perceel voorkomt dat wel of niet voldoet aan het gestelde criterium, dan is aangenomen dat het perceel representatief is voor het gehele kaartvlak.

Alleen voor 29 juli zijn met de beide methoden, binnen het gestelde criterium, meestal dezelfde verdampingsreducties berekend per kaartvlak. Het is niet mogelijk uitspraken per bodemeenheid, bodemsoort of grondwatertrap te doen omdat voor 25 mei en 19 juni het aantal kaartvlakken die voldoen aan het gestelde criterium, gelijk is aan het aantal vlakken dat niet voldoet aan het gestelde criterium. Deze verhouding van 50 procent blijkt voor 25 mei en 19 juni op te gaan voor bijna alle bodemeenheden, bodemsoorten en grondwatertrappen.

In dit onderzoek is eveneens nagegaan of het voldoen aan het gestelde criterium gewasafhankelijk is. Kort gras, middelhoog gras, lang gras en maïs zijn als verschillende gewassen onderscheiden. Wanneer een perceel in twee kaartvlakken ligt en in het ene kaartvlak voldoet de berekende verdampingsreductie van het perceel wel aan het gestelde criterium en in het andere kaartvlak voldoet deze niet aan het gestelde criterium, dan is pas een uitspraak gedaan, indien tenminste 75 procent wel of niet voldoet aan het gestelde criterium.

Voor 29 juli blijkt ongeveer 80 procent van de geselecteerde percelen te voldoen, terwijl voor 25 mei en 19 juni weer de 50 procent verhouding gevonden is.

Voordat in alle gevallen eenduidige uitspraken gedaan kunnen worden dient in een vervolg onderzoek gedetailleerd te worden ingegaan op de verschillende fouten die invloed hebben op de bepaling van de verdampingsreducties met een hydrologisch model en de verdampingsbepaling met remote sensing.

## **1 INLEIDING**

### **1.1 Doel van het onderzoek**

In dit project gaat het om een concrete studie naar de validatie van gesimuleerde verdampingsreducties met remote sensing in het waterwingebied Mander in het noordoosten van de provincie Overijssel. Dit gebied is recent gekarteerd op een schaal 1 : 10 000 (Stoffelsen en Van Holst, 1985). Wösten et al. (1987) en Bregt en Beemster (1987) hebben voor het gebied kaarten vervaardigd van de gemiddelde verdampingsreductie over een periode van 30 jaar met als uitgangspunt respectievelijk representatieve profielen en afzonderlijke boringen. Vanwege de grote hoeveelheid gegevens die in het waterwingebied Mander zijn verzameld, leent dit gebied zich bij uitstek voor dit onderzoek. Uit het waterwingebied is een gebied van 400 hectare gekozen als proefgebied.

Vergelijking van de gesimuleerde verdampingsreductie met de verdampingsreducties verkregen met remote sensing biedt een uitstekende validatie mogelijkheid van berekeningen met hydrologische modellen. Tevens wordt in het waterwingebied Mander aangetoond welke praktische betekenis remote sensing heeft voor het werk van het DLO-Staring Centrum.

### **1.2 Achtergrond**

Bij het DLO-Staring Centrum worden bodemkaarten bodemfysisch geïnterpreteerd met als eindprodukt een simulatiekaart. Binnen een simulatiekaart worden verschillende eenheden onderscheiden op basis van bodemsoort en grondwatertrap. Iedere eenheid heeft zijn eigen bodemfysische kenmerken die voor iedere eenheid worden gekarakteriseerd door een waterretentiecurve en een doorlatendheidskarakteristiek per onderscheiden bodemlaag. Met deze simulatiekaart en gegevens betreffende de grondwaterstand en het weer, kunnen simulatieberekeningen van de verdampingsreductie van een gebied worden gemaakt. Kaarten die de verdampingsreductie van een gebied weergeven, worden bijvoorbeeld gebruikt voor het ontwerpen van provinciale grondwaterplannen en voor kwantitatieve landevaluatie.

Met de bodemkaart als uitgangspunt kan een aanpak worden gekozen waarbij gebruik wordt gemaakt van de representatieve profielen voor de onderscheiden legenda-eenheden (Wösten et al., 1987) of een aanpak waarbij gebruik wordt gemaakt van de afzonderlijke boringen in de kaartvlakken (Bregt en Beemster, 1987). In beide gevallen is het eindprodukt een kaart die de verdampingsreducties van een gebied weergeeft.

Om na te gaan of de uitkomsten van de simulatieberekeningen realistische waarde opleveren, dienen deze waarden op een onafhankelijke manier te worden gevalideerd. Tot nu toe is deze validatie onvoldoende of in het geheel niet uitgevoerd. Vanwege de toepasbaarheid van remote sensing op regionale schaal, biedt deze methode goede mogelijkheden om het gesignaleerde probleem aan te pakken (Thunnissen en Nieuwenhuis, 1988).

Het gebruik van remote sensing in dit kader leidt tevens tot een verdere operationalisering van de bestaande remote sensing-technieken. Gedurende droge perioden in het groeiseizoen van 1989 zijn drie remote sensing-opnamen van het gebied Mander gemaakt. Voor de opname op de drie tijdstippen is het uit kostenoverwegingen niet haalbaar dure scannertechnieken toe te passen ook al gaat het om een relatief klein oppervlak van 400 hectare. In deze studie worden de operationele mogelijkheden van relatief goedkope remote sensing-technieken onderzocht, zoals thermische video en kleurenfotografie.

Met de drie remote sensing-opnamen verspreid over het groeiseizoen kan inzicht worden verkregen in de seizoensdynamiek van de verdampingsreductie.

### **1.3 Werkwijze**

Gedurende drie droge perioden in het groeiseizoen van 1989 zijn met een thermische video-camera opnamen en kleurenfoto's gemaakt van het proefgebied in het waterwingebied Mander. De opnamen zijn gemaakt vanaf 1,5 kilometer hoogte. Deze opnamehoogte resulteert in thermische video-opnamen met een geometrische resolutie van 6 tot 7 meter.

Een uitgebreid veldmeetprogramma is gedurende het onderzoek uitgevoerd:

- in veel buizen zijn van maart tot en met september wekelijks grondwaterstanden gemeten;
- er is een gewassenkaart gemaakt;
- voor iedere vluchtdag zijn per perceel de gewashoogte en de bodembedekking geschat;
- de toepassing van berekening is geïnventariseerd;
- tijdens de remote sensing-vluchten zijn referentie temperaturen op de grond gemeten.

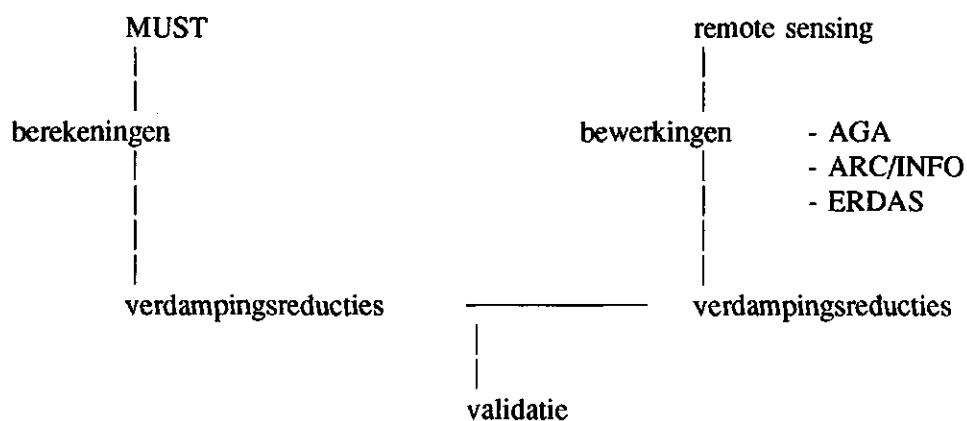
Door combinatie van veldwaarnemingen met de remote sensing-opnamen worden kaarten vervaardigd die de verdampingsreducties van het proefgebied op verschillende vluchtdagen weergeven. Met een model wordt de verdampingsreductie voor 1989 gesimuleerd. Van de gesimuleerde verdampingsreducties op de vluchtdagen wordt een kaart gemaakt. Vergelijking van de gesimuleerde en de met remote sensing verkregen verdampingsreducties geeft een validatie van de gesimuleerde verdampingsreducties in Mander.

### **1.4 Structuur van het rapport**

In hoofdstuk 2 wordt het onderzoeksgebied Mander besproken. De berekeningen uitgevoerd met het hydrologisch model worden toegelicht in hoofdstuk 3. De verdampingsreducties bepaald met remote sensing worden in hoofdstuk 4 besproken. In hoofdstuk 5 komt de uiteindelijke validatie van de gesimuleerde verdampingsreducties met remote sensing aan de orde. Conclusies en aanbevelingen komen in het slothoofdstuk 6 ter sprake.

Handelingen die voor MUST of voor de remote sensing-verwerking noodzakelijk zijn geweest, worden steeds in aparte bijlagen weggeschreven om de leesbaarheid van het rapport ten goede te laten komen.

Schematisch kan het onderzoek door figuur 1 worden weergegeven.



*Fig. 1 Schematische weergave van de structuur van het onderzoek*

## 2 ONDERZOEKSGBIED

In opdracht van de Landinrichtingsdienst te Utrecht heeft de Stichting voor Bodemkartering van mei 1984 tot februari 1985 een bodemkundig-hydrologische inventarisatie uitgevoerd in het gebied van de waterwinningen Manderveen en Manderheide. Het gebied omvat het noordelijk gedeelte van de gemeente Tubbergen langs de duitse grens, weergegeven in figuur 2. Het totale oppervlak, inclusief bossen en bebouwing bedraagt, ca. 1690 hectare waarvan 1435 hectare is gekarteerd. Niet in het onderzoek betrokken zijn de bossen, heidevelden, bebouwing en de camping "De Tuttenberg" met een totaal oppervlak van 255 hectare. In totaal zijn 2100 boringen verricht. Aan de hand van deze boringen zijn de volgende grootheden vastgesteld:

- de subgroep van de bodemclassificatie;
- de bewortelbare diepte en ook eventueel de diepte van verwerking;
- de textuur, het humusgehalte en het leemgehalte van de boven- en ondergrond;
- een gemiddelde vochtkarakteristiek van de bewortelbare diepte op basis van humus- en leemgehalte;
- de samenstelling van de ondergrond in termen van het capillair geleidingsvermogen;
- schattingen van de gemiddelde hoogste en de gemiddelde laagste grondwaterstand.

Aan de hand van de bodemclassificatie en het grondwaterstandsverloop is een vlakkenkaart samengesteld. Een vlak met één bodemtype, maar waarbinnen verschillende grondwatertrappen voorkomen, wordt opgedeeld in verschillende kaartvlakken.

Van deze waarnemingen, schattingen en vlakkenkaart is in dit onderzoek gebruik gemaakt. Slechts een deel van het gebied is in het onderzoek betrokken omdat:

- gedetailleerde veldopnamen voor dit onderzoek noodzakelijk zijn;
- een kleiner gebied toereikend is om de doelstellingen van dit onderzoek te verwezenlijken;
- de kosten hierdoor beperkt kunnen worden.

Gekozen is voor een onderzoeksgebied van ongeveer 400 hectare groot, gelegen in het zuid-westen van het eerder besproken geïnventariseerde gebied, weergegeven in figuur 2. Voor de geologie en de beschrijving van de verschillende bodemeenheden wordt verwezen naar de rapporten van Dijkstra (1988) en Stoffelsen en Van Holst (1985) die tot stand zijn gekomen naar aanleiding van eerdere onderzoeken in dit gebied.



### 3 BEREKENING VAN VERDAMPINGSREDUCTIES MET HET HYDROLOGISCH MODEL MUST

#### 3.1 Inleiding

Voor de berekening van de verdampingsreductie wordt gebruik gemaakt van het hydrologisch model MUST (Moistureflow through Unsaturated soil above a Shallow water Table), zoals beschreven is in De Laat (1985). Opgemerkt dient te worden dat gerekend wordt met de MUST versie verschenen in 1985. Na 1985 zijn nog enkele wijzigingen aangebracht (De Laat, 1989). Deze laatste versie kan echter alleen op de personal computer gedraaid worden, terwijl alle invoerbestanden op de VAX staan. Door enkele testruns uit te voeren met de verschillende versies blijkt dat de resultaten nagenoeg hetzelfde zijn. Dit model is gekozen omdat alle invoerparameters voor dit model aanwezig zijn. In het algemeen wordt aangenomen dat dit model goed in staat een betrouwbaar beeld te geven van de hydrologische situatie in het onverzadigde deel van de bodem. Voor een eenvoudige beschrijving van het model MUST wordt verwezen naar Dijkstra (1988). Het model MUST heeft de volgende invoergegevens nodig om de verdampingsreductie te berekenen:

- bodemkundige gegevens: deze gegevens worden onderscheiden in gegevens voor de wortelzone en gegevens van de ondergrond tot aan de waterspiegel en worden constant in de tijd verondersteld;
- hydrologische gegevens: deze gegevens vormen de onder- en bovenrandvoorwaarde van het model, zijn tijdsafhankelijk en dienen voor iedere tijdstap opnieuw te worden ingevoerd;
- gewasgegevens: de verdamping is voor ieder gewas anders daarom moet de gewassoort in de invoergegevens gedefinieerd te worden;
- gegevens die de voortgang van het proces beschrijven en de uitvoer controleren: aan deze gegevens wordt verder geen aandacht geschonken, omdat deze gegevens fysisch gezien geen enkele betekenis hebben.

In het totale gebied Mander zijn ca. 2100 boringen verricht, waarvan uitvoerige profielbeschrijvingen gemaakt zijn. Bij deze inventarisatie zijn de volgende gegevens vastgelegd die voor dit onderzoek gebruikt kunnen worden:

- de profielopbouw van de ondergrond;
- zo mogelijk de huidige gemiddelde grondwaterstand, GHG, en de gemiddelde laagste grondwaterstand, GLG, en de (voormalige) GHG en de GLG uit de COLN-periode: dit is de periode waarin gestart is met het opzetten van een grootschalig grondwaterstandsmetnet in Nederland (1952-1955);
- de dikte van de effectieve wortelzone;
- de vocht karakteristiek van de wortelzone.

De boordiepte varieert van 1,20 tot 3,20 meter beneden maaiveld. De geïnventariseerde veldgegevens zijn, behalve op boorstaten, ook in codevorm vastgelegd op de topografische veldkaarten, schaal 1 : 5 000. Op deze veldkaarten zijn zoveel mogelijk al in het veld vlakken afgegrensd, waarbinnen de profielen overeenkomst vertonen met de vroegere en/of huidige hydrologische toestand, de dikte van de wortelzone en de profielopbouw. Deze veldkaarten en de daarbij behorende boorstaten vormen de basis voor de bodemkaart, de bijzondere-lagenkaart, de vlakkenkaart en de GLG-verlagingskaart (voormalige GLG minus huidige GLG), allen met schaal 1:10.000 (Stoffelsen en Van Holst, 1985).

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van:

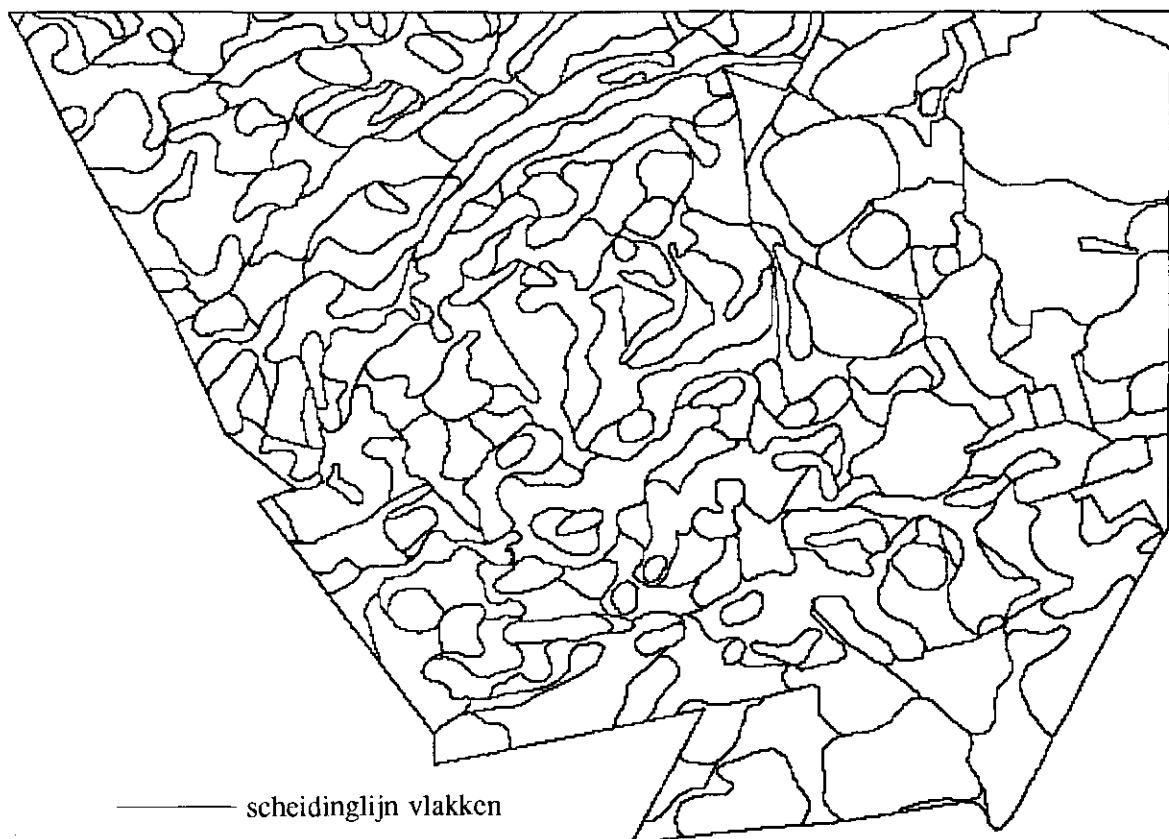
- de vlakkenkaart (figuur 3);
- de bodemkaart (figuur 4);
- de grondwatertrappenkaart (figuur 5).

Het onderzoeksgebied van 400 hectare is opgebouwd uit 211 kaartvlakken. In dit onderzoek wordt een kaartvlak gezien als een rekeneenheid bestaande uit de combinatie van grondwatertrap en bodemsoort. Dit onderzoek beperkt zich tot deze kaartvlakken. Voor ieder van deze 211 kaartvlakken kan de verdampingsreductie berekend worden. Om deze berekening uit te voeren moeten waarden ingevoerd worden die representatief zijn voor het betreffende kaartvlak. De gegevens dienen daarom geschematiseerd en gegeneraliseerd te worden. In paragraaf 3.2 wordt besproken hoe de verschillende invoergegevens geschematiseerd en gegeneraliseerd worden.

### 3.2 Invoergegevens

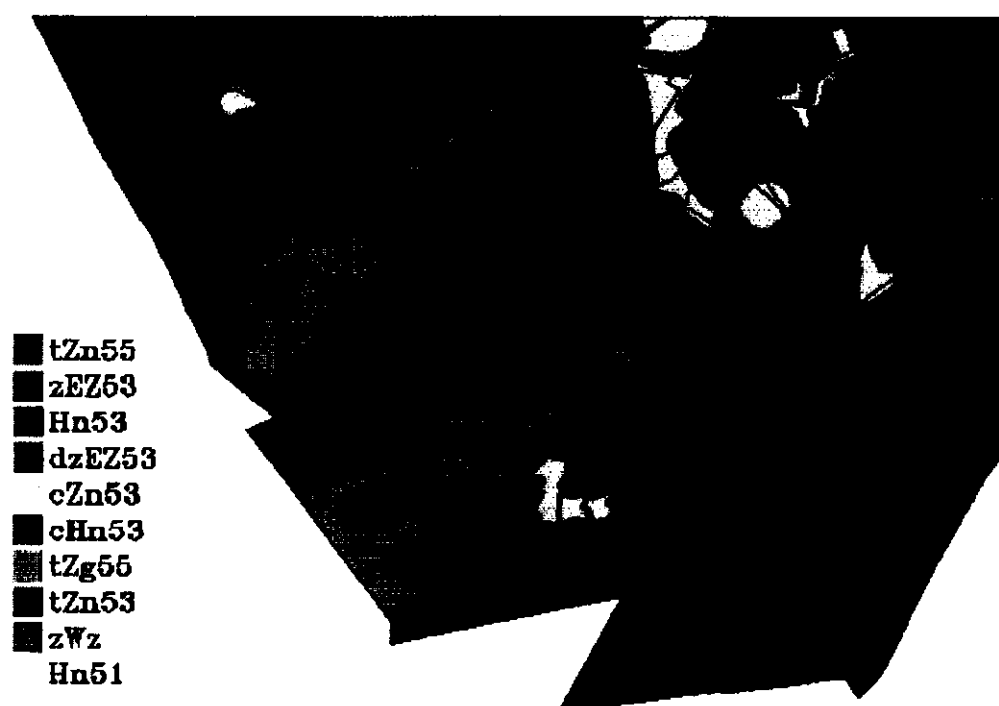
Alle invoergegevens die hierna besproken worden, zijn opgeslagen in verschillende files (aanhangsel 12). Weergave van alle data is achterwege gelaten, omdat:

- een groot aantal van deze data is weergegeven in Stoffelsen en Van Holst (1985);
- dit de leesbaarheid van dit rapport niet ten goede komt;
- het accent van dit onderzoek niet ligt op het rekenen met een hydrologisch model, maar op de validatie van de resultaten.



**Fig. 3** *Vlakkenkaart van het onderzoeksgebied Mander*





*Fig. 4 Bodemkaart van het onderzoeksgebied Mander*



*Fig. 5 Grondwatertrappenkaart van het onderzoeksgebied Mander*

### 3.2.1 Bodemkundige gegevens

In het model MUST wordt onderscheid gemaakt tussen de effectieve wortelzone en de ondergrond.

#### 3.2.1.1 Effectieve wortelzone

De effectieve wortelzone wordt gedefinieerd als het gedeelte van de bovengrond, waarin 80 procent van de wortelmassa aanwezig is (Rijtema, 1971). De vochtleverantie door de effectieve wortelzone wordt op de eerste plaats bepaald door de dikte van de effectieve wortelzone. Daarnaast is de hoeveelheid beschikbaar vocht van belang.

De dikte van de effectieve wortelzone is per boring vastgesteld op basis van de profielopbouw, pakking en de aanwezigheid van plantenwortels en gemiddeld per kaartvlak. De maximale dikte voor gras is gesteld op 40 centimeter, omdat beneden deze diepte de wortels van het gras niet in staat is de grond tot verwelkingspunt uit te putten (Stoffelsen en Van Holst, 1985). Op enkeerdgronden en diep verwerkte gronden kan door diep wortelende gewassen echter meer vocht onttrokken worden. Een ander in het onderzoeksgebied veel voorkomend gewas is maïs. Hiervoor is de diepte van de effectieve wortelzone niet gekarteerd in het veld. Om toch rekening te houden met de bodemsoort is de effectieve wortelzone voor maïs per kaartvlak gedefinieerd als de effectieve wortelzone van gras (engels raaigras) plus 30 centimeter. Thunnissen en Siemonsma, (1987) stellen de dikte van de effectieve wortelzone gelijk aan de dikte van de humushoudende bovengrond +10 centimeter met een maximum van 80 centimeter. De oplossing gekozen in dit onderzoek voldoet nagenoeg aan deze definitie. Een voordeel van deze oplossing is dat hij eenvoudig te programmeren is (aanhangsels 1 en 11).

De hoeveelheid beschikbaar vocht per decimeter is gelijk aan het verschil tussen het evenwichtsvochtgehalte, pF 2, aan het begin van het groeiseizoen en het vochtgehalte bij het verwelkingspunt, pF 4,2. Met de vocht karakteristiek van de effectieve wortelzone kan de totale hoeveelheid beschikbaar vocht bij een bekende voorjaarsgrondwaterstand berekend worden.

Om de hoeveelheid beschikbaar vocht tijdens de kartering vast te stellen is gebruik gemaakt van een schema waarin, op basis van reeks standaard-vocht karakteristieken, een relatie is vastgesteld tussen humus- en leemgehalte (leem < 50  $\mu$ m) enerzijds en het percentage vocht bij verschillende vochtspanningen anderzijds. Met deze relatie is aan de effectieve wortelzone van elke boring een gemiddelde vocht karakteristiek toegekend. Deze is vervolgens gegeneraliseerd per kaartvlak.

De gehanteerde reeks standaard-vocht karakteristieken is samengesteld door de afdeling Bodemfysica en Hydrologie van de Stichting voor Bodemkartering (Krabbenborg, 1983). Voor de onderzochte 211 kaartvlakken zijn 16 vocht karakteristieken onderscheiden. Voor de criteria waarop de toedeling van de vocht karakteristieken plaatsvindt, wordt verwezen naar Stoffelsen en Van Holst (1985).

### 3.2.1.2 Opbouw van de ondergrond

De capillaire aanvoer van vocht gedurende het groeiseizoen vanuit de ondergrond naar de effectieve wortelzone wordt bepaald door:

- het verloop van de zuigspanning (drukhoogte) aan de onderzijde van de wortelzone;
- de afstand van de wortelzone tot het grondwater.

De ondergrondtypen zijn getypeerd door er van uit te gaan dat er een verband bestaat tussen het leemgehalte enerzijds en het capillaire geleidingsvermogen anderzijds. Dit resulteert in 79 verschillende ondergrondtypen voor de 211 kaartvlakken. Per ondergrondtype worden één of meer lagen onderscheiden. Per onderscheiden laag wordt de laagdikte uitgedrukt ten opzichte van de onderzijde van de wortelzone en is bepaald uit welk materiaal de laag is opgebouwd. Lager dan twee meter beneden maaiveld zijn geen verdere differentiaties aangebracht. Beneden deze diepte worden aan de bodem dezelfde capillaire eigenschappen toegekend als de aangrenzende bovenliggende laag (Stoffelsen en Van Holst, 1985).

Aan het materiaal waaruit een laag is opgebouwd kan een  $K(h)$ -relatie (doorlatendheidskarakteristiek) worden toegewezen. Deze  $K(h)$ -relatie kan uit de literatuur gehaald worden of via metingen bepaald worden. De  $K(h)$ -relaties zijn ontleend aan reeds op het DLO-Staring Centrum aanwezige bestanden. Voor afwijkende materialen zijn metingen uitgevoerd. In totaal worden voor de 211 kaartvlakken 11  $K(h)$ -relaties onderscheiden. Dit komt dus overeen met 11 verschillende materialen.

### 3.2.2 Hydrologische gegevens

Om de berekening van de verdampingsreductie met MUST mogelijk te maken moet een onder- en een bovenrandvoorwaarde gedefinieerd worden.

#### 3.2.2.1 Onderrandvoorwaarde

Als onderrandvoorwaarden zijn de volgende definities mogelijk:

- de onderrandflux  $q_w$  als functie van de grondwaterstand  $W$ ;
- de onderrandflux  $q_w$  is gegeven;
- de grondwaterstand  $W$  is gegeven.

In het onderzoeksgebied worden de grondwaterstanden elke 10 dagen gemeten in grondwaterstandsbuizen waarvan er over het gebied 29 verspreid staan. Er waren reeds 13 buizen aanwezig, geplaatst door de WMO (Waterleiding Maatschappij Overijssel), en er zijn voor dit onderzoek nog eens 16 geplaatst. Voor een overzicht van de standplaatsen van deze buizen wordt verwezen naar Dijkstra (1988). In alle voorkomende grondwatertrappen zijn buizen geplaatst. In gebieden met de grondwatertrappen VII en VII\* staan maar weinig buizen, omdat hier al snel in het voorjaar de grondwaterstand dieper zit dan twee meter. Er is dan geen capillaire vochtlevering meer.

Duidelijk is dat niet in alle vlakken een grondwaterstandsbuis staat. In dit geval dienen de meetgegevens gegeneraliseerd te worden. Er is gekozen voor de volgende

generalisatie. In elk vlak zijn bij boringen de GHG en de GLG bepaald. Het verschil in GHG of GLG tussen het vlak zonder buis en een vlak met dezelfde bodemeenheden en grondwatertrap, waarin wel een buis staat, wordt bij de gemeten waterstand opgeteld of afgetrokken, afhankelijk of de GHG dan wel de GLG van het vlak zonder buis dieper dan wel ondieper ligt dan de GHG of GLG van het vlak met buis. Dit zijn de zogenaamde correctiefactoren. Ligt de gemeten grondwaterstand in het vlak met buis dicht bij de GHG, dan wordt gerekend met de GHG-correctiefactor, ligt de gemeten grondwaterstand dicht bij de GLG, dan wordt gerekend met de GLG-correctiefactor.

Op deze manier kan de grondwaterstand als onderrandvoorwaarde gebruikt worden voor alle kaartvlakken. Aangezien in dit onderzoek de verdampingsreductie per dag wordt berekend moet de grondwaterstand per dag ingevoerd worden. De grondwaterstand per dag wordt bepaald door lineaire interpolatie tussen de 10-daagse waarnemingen.

### 3.2.2.2 Bovenrandvoorwaarde

Twee componenten maken deel uit van de bovenrandvoorwaarde; de neerslag en de referentieverdamping. De neerslag meet het KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) op meer plaatsen op dagbasis. In dit onderzoek zijn de neerslaggegevens van het station in Ootmarsum gebruikt.

De referentieverdamping berekent het KNMI voor vijf stations in Nederland op dagbasis. In dit onderzoek is met de referentieverdamping gerekend, zoals berekend voor de vliegbasis Twente. Dit station is het dichtst bij het onderzoeksgebied gesitueerd. De referentieverdamping wordt berekend voor gras. Voor deze berekening maakt het KNMI gebruik van de Makkink-formule. Als de referentieverdamping van een ander gewas ingevoerd wordt, dient deze gecorrigeerd te worden. In aanhangsel 8 wordt dieper in gegaan op de verdampingsberekening met de Makkink-formule en de correctiemethode voor begroeiing met andere gewassen dan gras.

Zowel de neerslag als de referentieverdamping worden voor alle vlakken gelijk verondersteld.

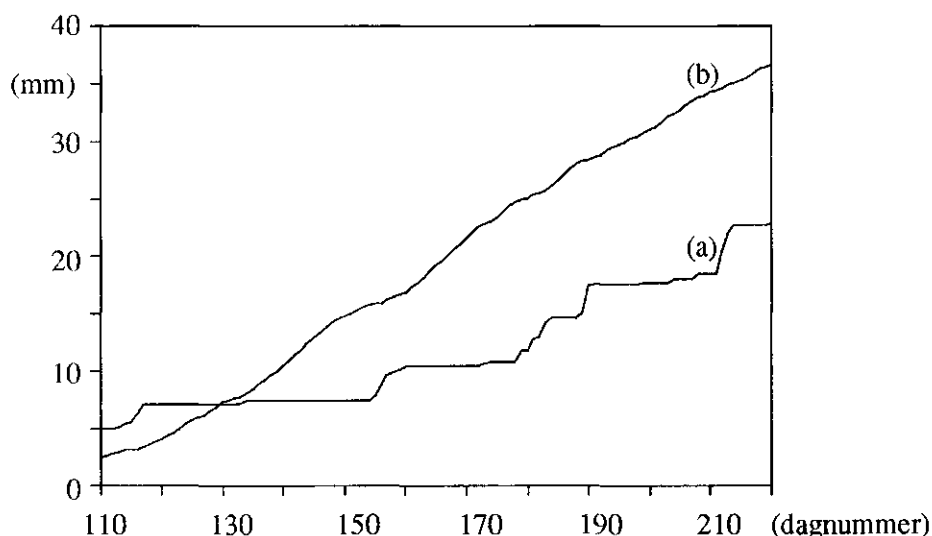


Fig. 6 De cumulatieve neerslaghoeveelheid (a) en de cumulatieve potentiële verdamping (b) uitgezet voor dag 110 tot en met dag 220

### **3.2.3 Gewasgegevens**

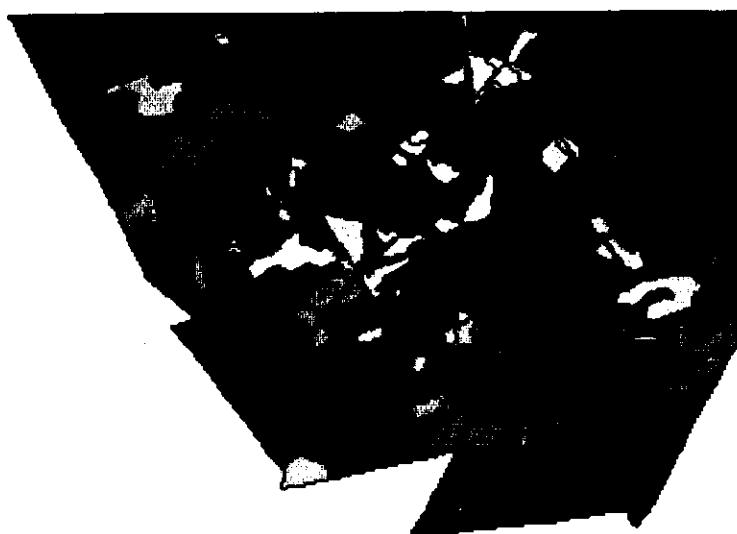
Tijdens de vluchtdagen (hoofdstuk 4) zijn de gewassen op het land stonden geïnventariseerd. In het onderzoeksgebied zijn gras en maïs veruit de belangrijkste gewassen.

De referentieverdamping kan al naar gelang de resultaten van deze inventarisatie aangepast worden. Het ene gewas heeft een grotere vochtbehoefte dan het andere gewas, zodat ook de vochtonttrekking verschillend is. Maïs wortelt dieper dan gras (paragraaf 3.2.1) en de referentiegewasverdamping voor maïs verschilt van de referentiegewasverdamping van gras (paragraaf 3.2.2).

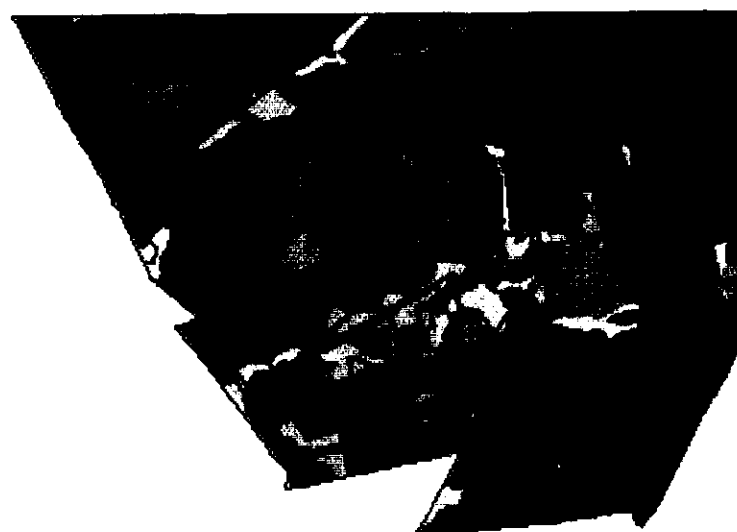
### **3.3 Berekende verdampingsreducties**

Door gebruik te maken van de hiervoor beschreven gegevens, aannamen en generalisaties is voor ieder kaartvlak de verdampingsreductie berekend van 1 april tot en met 31 augustus. Indien binnen één kaartvlak zowel grasland als maïsbebouwing voorkomt, is voor beide gewassoorten de verdampingsreductie berekend. In aanhangsel 2 zijn de resultaten van de simulaties per kaartvlak en per gewas weergegeven. Figuur 7 geeft de verdampingsreducties weer op de drie vluchtdagen.

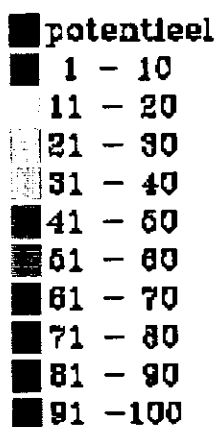
25 mei



19 juni



29 juli



**Fig. 7** Verdampingsreducties berekend op 25 mei, 19 juni en 29 juli met het hydrologisch model MUST

## **4 BEREKENING VAN VERDAMPINGSREDUCTIES UIT THERMISCHE VIDEOBEELDEN**

### **4.1 Inleiding**

In hoofdstuk 3 komt naar voren hoe verdampingsreducties berekend worden met het hydrologisch model MUST. Een nadeel van deze berekeningsmethode is dat veel parameters gegeneraliseerd moeten worden, voordat voor het gehele gebied de verdampingsreducties berekend kunnen worden. Daarnaast zijn voor het berekenen veel invoergegevens nodig. Het verzamelen en generaliseren van deze invoergegevens is een tijdrovende zaak. Het is echter mogelijk gebleken verdampingsreducties af te leiden uit remote sensing-opnamen (Gurney en Camillo, 1984; Rosema et al., 1978). Deze remote sensing-opnamen dienen dan wel gemaakt te zijn in het thermische deel van het electromagnetische spectrum (8 - 14  $\mu\text{m}$ ).

Remote sensing-opnamen kunnen op verschillende manieren tot stand komen. Het gaat voor dit onderzoek te ver om op alle mogelijkheden in te gaan. In dit onderzoek is gekozen voor opnamen gemaakt met een thermische video vanuit een laagvliegend vliegtuig. De kosten die aan deze wijze van registreren verbonden zijn, zijn relatief laag ten opzichte van andere manieren van opnemen.

### **4.2 Benodigde gegevens**

Naast de remote sensing-gegevens, in dit geval thermische videobeelden, zijn veldwaarnemingen nodig. De atmosfeer heeft een storende werking, zodat de gemeten temperatuur met remote sensing niet gelijk is aan de temperatuur in het veld. De twee temperaturen zijn wel met elkaar gerelateerd. Naast deze gegevens zijn er gegevens nodig omtrent de soort, de hoogte en de bedekkingsgraad van het gewas, omdat deze factoren van invloed zijn op de verdamping.

#### **4.2.1 Vluchtgegevens**

In 1989 zijn drie vluchten uitgevoerd boven het onderzoeksgebied om remote sensing-opnamen te maken. De vluchten hebben plaats gevonden op 25 mei, 19 juni en 29 juli.

De vluchten zijn uitgevoerd op heldere dagen, bij een wolkenloze hemel, op een hoogte van 1,5 kilometer met een resolutie van 6 tot 7 meter. Tijdens de vluchten is gefilmd met een thermische video, AGA-systeem, en zijn er luchtfoto's gemaakt van het gebied. Voor de navigatie is gebruik gemaakt van de kerktorens van Vasse en Tubbergen. Het is niet eenvoudig om het totale gebied op video en film vast te leggen, omdat:

- gefilmd werd met een camera die vast in het vliegtuig geïnstalleerd was en kleine wijzigingen in de stand van het vliegtuig grote veranderingen in de opnamen teweeg brengen;
- navigatie aan de hand van kerktorens geen eenvoudige opgave is.

Omdat de hydrologische berekeningen op perceelsniveau plaatsvinden is het geen bezwaar dat het onderzoeksgebied niet volledig is opgenomen met de thermische video. Er bevinden zich in het gebied nog voldoende percelen om onderzoek naar de relatie tussen berekende en gemeten vochttekorten uit te voeren. Een nadeel is echter dat deze onnauwkeurigheid in de opnamen temporele vergelijking van de beelden bemoeilijkt. Figuur 8 geeft een indruk van de nauwkeurigheid, waarmee gevlogen is.

#### 4.2.2. Veldgegevens

Tijdens de vluchtdagen zijn de volgende gegevens in het onderzoeksgebied geïnventariseerd:

- gewas per perceel
  - maïs;
  - gras.

Als het perceel bedekt is met gras dan:

- de hoogte van het gras
  - < 5 cm;
  - 5-15 cm;
  - >15 cm;
- de bedekkingsgraad
  - > 90%;
  - < 90%
- is het perceel al dan niet berekend.

Al deze waarnemingen kunnen helpen bij de interpretatie van de thermische videobeelden, en zijn onmisbaar voor het bepalen van de verdampingsreducties. Verder zijn op verschillende plaatsen in het veld temperaturen gemeten. Met deze metingen kan een relatie worden gelegd tussen de gemeten temperatuur en de temperatuur die met de thermische video geregistreerd is (aanhangsel 7).

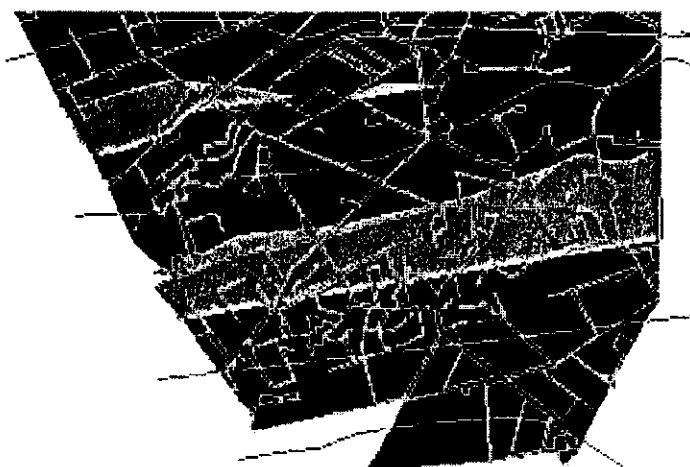
#### 4.3 Verwerking van de gegevens

Om van thermische videobeelden tot verdampingsbeelden te komen, moeten bewerkingen worden uitgevoerd. De volgende bewerkingsstappen kunnen onderscheiden worden:

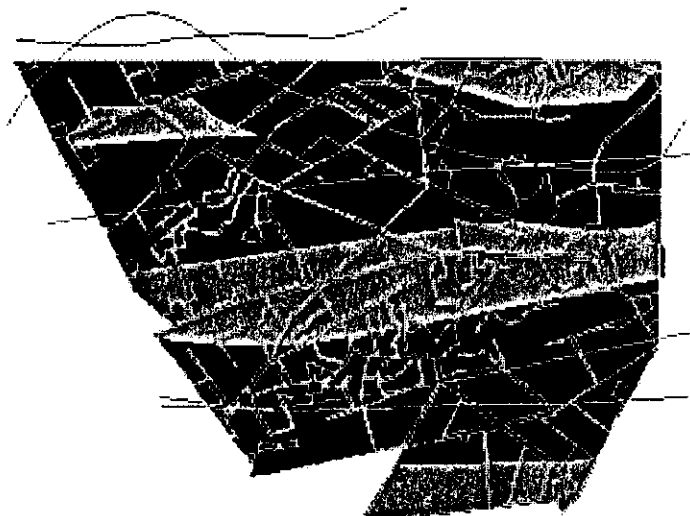
- de videobeelden worden geselecteerd en vervolgens gedigitaliseerd (paragraaf 4.3.1);
- de gedigitaliseerde beelden worden geometrisch gecorrigeerd (paragraaf 4.3.2);
- de gecorrigeerde beelden worden geografisch georiënteerd (paragraaf 4.3.3);
- de digitale waarden worden omgerekend naar werkelijke temperaturen (paragraaf 4.3.4);
- met de berekende temperaturen kunnen vochttekorten berekend worden (paragraaf 4.3.5).



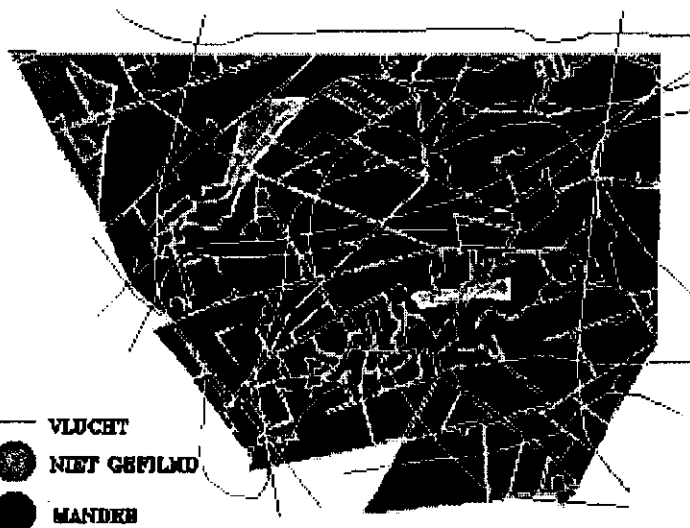
25 mei



19 juni



29 juli



- VLUCHT
- NIET GEFILMD
- MANDER

**Fig. 8** Gebieden in het onderzoeksgebied Mander die gefilmd zijn op de verschillende vluchtdagen

#### 4.3.1 Selectie en digitalisatie

Tijdens de vluchten zijn thermische videobeelden en luchtfoto's gemaakt. De luchtfoto's worden gebruikt om de plaats van de thermische videobeelden in het veld te bepalen. Op deze manier kan gereconstrueerd worden welke delen van het gebied opgenomen zijn. Alleen percelen die binnen deze opnamen vallen, komen voor het onderzoek in aanmerking. Bij temporele verwerking dient het perceel minimaal bij twee vluchtdagen binnen de opnamen te vallen.

Het digitaal verwerken van alle videobeelden vergt teveel tijd en is, gezien de doelstelling van dit onderzoek, niet noodzakelijk. Om het aantal percelen te beperken, is gekozen voor gras- en maïspercelen. Uit eerder onderzoek (Thunnissen, 1984) is gebleken dat de bodem voor meer dan 90 procent bedekt moet zijn om een goede indruk te krijgen van de temperatuur van het gewas. Bij een bedekkingsgraad kleiner dan 90 procent gaat de uitstraling van de bodem een te grote rol spelen. Hierdoor kunnen de vochttekorten overschat worden. Voor maïspercelen doet de opname van 25 mei geen enkele bijdrage doet aan het onderzoek. Daar komt nog bij dat de maïs nog zo laag staat dat verdampingsreducties niet of nauwelijks zullen optreden. Dit geldt ook, zij het in mindere mate, voor 19 juni.

De gras percelen met een bedekkingsgraad groter dan 90 procent worden opgesplitst in drie groepen met als kenmerk de gewashoogte. Aanhangsel 3 beschrijft de handelingen die moeten worden verricht om tot een nauwkeurige selectie te komen. De kaarten die met ARC/INFO (aanhangsel 3) gemaakt zijn, worden omgezet naar ERDAS (Earth Resources Data Analyses System), omdat met dit systeem de beeldverwerking plaatsvindt. In figuur 9 staan voor de verschillende maanden de geselecteerde percelen weergegeven.

Met het AGA-systeem worden de beelden van de geselecteerde percelen gedigitaliseerd. Deze gedigitaliseerde beelden werden met een conversie-programma overgezet naar het ERDAS-systeem. Aanhangsel 5 geeft een duidelijk overzicht van de handelingen voor de digitalisatie en de conversie van het AGA-systeem naar het ERDAS-systeem.

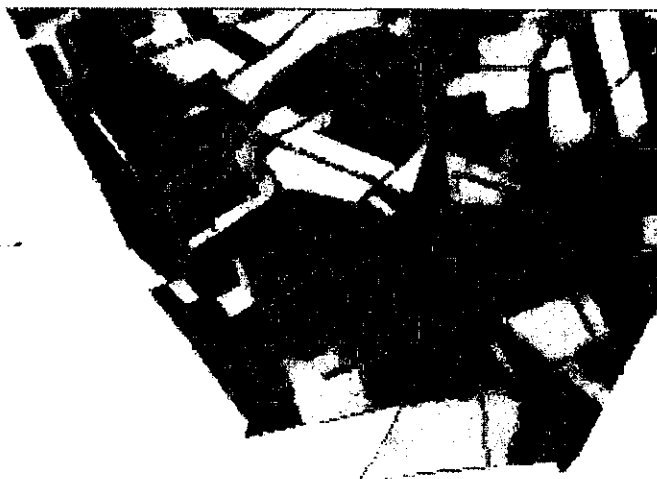
#### 4.3.2 Geometrische correctie

De beelden die nu geconverteerd zijn naar het ERDAS-systeem zijn niet in overeenstemming met de werkelijke ligging in het veld. Dit komt doordat:

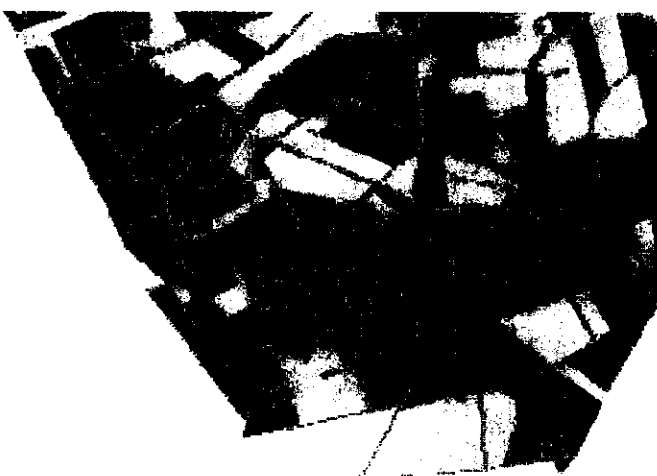
- met een camera niet alle punten in het veld loodrecht op te nemen zijn;
- het vliegtuig verschillende bewegingen uitvoert;
- er hoogteverschillen in het terrein aanwezig zijn.

Van deze laatste verstoring is in het onderzoeksgebied weinig sprake. De beelden dienen ten gevolge van de twee overgebleven verstoringen geometrisch gecorrigeerd te worden. Het beeld is na geometrische correctie in overeenstemming met de topografische kaart. Deze laatste is een goede representatie van de werkelijkheid.

25 mei



19 juni



29 juli



- gras < 5
- gras 5 - 15
- gras > 15
- maïs
- niet geselecteerd

**Fig. 9** Ligging van de graspercelen met een bedekkingsgraad groter dan 90 procent en alle maïispercelen voor de drie vluchtdagen

Voor deze geometrische correctie moeten een minimaal 3 paspunten worden aangewezen op de topografische kaart en op het nog niet gecorrigeerde beeld. Bij dit aanwijzen worden de coördinaten bepaald van de paspunten op de topografische kaart en in het beeld. Met ERDAS wordt nu een polynoom bepaald, waarmee alle pixels van het beeld omgerekend kunnen worden naar de coördinaten van de topografische kaart. Aanhangsel 6 geeft een beschrijving van de geometrische correctie.

#### 4.3.3 Geografische oriëntatie

De onderlinge relatie tussen de verschillende geometrisch gecorrigeerde beelden wordt vastgelegd door ze geografisch te oriënteren. Alle beelden worden ingepast in de coördinaten van de topografische kaart. Een beschrijving van de geografische oriëntatie wordt gegeven in aanhangsel 6.

#### 4.3.4 Omrekenen van digitale waarden naar werkelijke temperaturen

De digitale waarden die nu verkregen zijn, geven nog geen juist beeld van de werkelijke temperaturen die gemeten zouden worden in het veld. De atmosfeer beïnvloedt de metingen. Hiervoor dient gecorrigeerd te worden. Er is een lineair verband tussen de werkelijke temperatuur en de digitale waarden. Dit lineaire verband kan beschreven worden volgens (Thunnissen, 1984):

$$T_c = \alpha + \beta \cdot T_d \quad (1)$$

waarin:  $T_c$  = temperatuur van het gewas (K)  
 $T_d$  = digitale waarde (K)  
 $\alpha, \beta$  = richtingscoëfficiënten (-)

De temperatuur vlak boven het gewas is tijdens de opnamen op verschillende plaatsen in het veld geregistreerd. Door deze plaatsen op de warmtebeelden op te zoeken is het mogelijk waarden voor de coëfficiënten vast te stellen. In aanhangsel 7 wordt dieper op deze vaststelling in gegaan. Voor de verschillende vluchtdagen worden de volgende waarden voor de richtingscoëfficiënten  $\alpha$  en  $\beta$  gevonden:

**Tabel 1** Waarden voor de richtingscoëfficiënten  $\alpha$  en  $\beta$  voor de omrekening van digitale waarden naar gewastemperaturen

vluchtdag	$\alpha$ (-)	$\beta$ (-)
25 mei	-0,7234	0,2128
19 juni	6,1136	0,2273
29 juli	3,9535	0,2326

Opvallend is de sterke overeenkomst in de richtingscoëfficiënten. De coëfficiënt  $\alpha$  verschilt van vluchtdag tot vluchtdag. Dit verschil is in dit onderzoek niet belangrijk, omdat gekeken wordt naar een temperatuurverschillen waardoor de waarde van  $\alpha$  geen rol meer speelt.

#### 4.3.5 Bepaling van de verdampingsreducties

Een thermisch infrarood beeld geeft informatie over evapotranspiratie van een gewas in een gebied op het tijdstip van de opname. Met een eenvoudige methode kunnen deze instantane waarden omgerekend worden naar 24-uur evapotranspiratiewaarden. Jackson et al. (1977) relateerde 24-uur evapotranspiratie ( $LE^{24}$ ) met dagelijkse netto straling ( $Rn^{24}$ ) en het verschil tussen de bodem- en de luchttemperatuur rond het midden van de dag ( $T_c - T_a$ ):

$$LE^{24} = Rn^{24} - B \cdot (T_c - T_a) \quad (2)$$

waarin:	L	= latente warmte	(J/kg)
	E	= evapotranspiratie flux	(kg/m <sup>2</sup> /s)
	B	= empirische coëfficiënt	(W/m <sup>2</sup> /K)
	$Rn^{24}$	= dagelijkse nettostraling	(W/m <sup>2</sup> )
	$T_c$	= temperatuur net boven gewas	(K)
	$T_a$	= luchttemperatuur	(K)

Uit onderzoeken van Sequin en Itier (1983) en Carlson en Buffum (1989) blijkt dat één unieke waarde voor B niet acceptabel is. Zij concluderen dat B afhankelijk is van onder andere de atmosferische stabiliteit, de ruwheidslengte, de windsnelheid en de referentiehoogte. Nieuwenhuis et al. (1985) hebben het genoemde temperatuurverschil vervangen door het verschil in temperatuur van een gewas dat transpireert onder de actuele condities ( $T_c$ ), en de temperatuur van datzelfde gewas als het transpireert onder optimale condities ( $T_c^*$ ). Dit temperatuurverschil kan direct uit de thermisch infrarood beelden verkregen worden. In plaats van de 24-uur netto straling gebruiken Nieuwenhuis et al. (1985) de 24-uur potentiële evapotranspiratie van het gewas ( $LE_p^{24}$ ). Op eenvoudige wijze kan het verschil in stralingstemperatuur direct getransformeerd worden naar een verschil in evapotranspiratie, volgens:

$$LE^{24} = LE_p^{24} - B' \cdot (T_c - T_c^*) \quad (3)$$

In dit onderzoek wordt gekeken naar de spreiding van de evapotranspiratiewaarden in een gebied. Hiervoor wordt overgegaan op relatieve waarden:

$$LE^{24} / LE_p^{24} = 1 - B' \cdot (T_c - T_c^*) \quad (4)$$

waarin:

$$B^r = B' / LE_p^{24} \quad (5)$$

Door formule (4) om te zetten naar formule (5) vinden we de zogenaamde verdampingsreductie:

$$1 - LE^{24} / LE_p^{24} = B^r \cdot (T_c - T_c^*) \quad (6)$$

Voordat echter met vergelijking (6) de actuele evapotranspiratie berekend kan worden moet eerst de waarde van  $LE_p^{24}$ ,  $T_c^*$  en  $B^r$  berekend worden. De waarde van  $T_c$  is voor ieder pixel verschillend (paragraaf 4.3.4).

*bepaling van de 24-uur potentiële evapotranspiratie  $LE_p^{24}$*

Voor de berekening van de 24-uur potentiële evapotranspiratie  $LE_p^{24}$  zijn standaardmethoden aanwezig (Priestley en Taylor, 1972; Monteith, 1973; Thom en Oliver, 1977; TNO, 1988). In dit onderzoek is gekozen voor de methode volgens Makkink (aanhangsel 8). Het KNMI berekent iedere dag de referentieverdamping volgens Makkink voor een aantal weerstations. In dit onderzoek is gekozen voor de referentieverdamping zoals berekend is voor het weerstation Twente. De referentieverdamping is met een gewasfactor eenvoudig om te zetten in  $LE_p^{24}$ .

*bepaling van de empirische coëfficiënt  $B^r$*

Thunnissen (1984) heeft een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de empirische coëfficiënten  $B'$  en  $B^r$  met het TERGRA-model (Socr, 1977). Met het TERGRA-model kunnen door het simuleren van het warmte- en watertransport in het bodem-plant-atmosfeer systeem, momentane verdampingsfluxen worden omgezet in verdampingsfluxen gemiddeld over 24 uur,  $LE^{24}$ . Waarden voor  $B'$  en  $B^r$  zijn nu eenvoudig te bepalen. Thunnissen concludeert dat  $B^r$  minder gevoelig is voor variaties en meteorologische omstandigheden dan  $B'$  en dat de empirische coëfficiënt  $B^r$  eenvoudig te benaderen is volgens:

$$B^r = a + b \cdot u(2) \quad (7)$$

waarin:	a	= empirische coëfficiënt afhankelijk van gewastype en hoogte	(1/K)
	b	= empirische coëfficiënt afhankelijk van gewastype en hoogte	(s/Km)
	u(2)	= windsnelheid gemeten op twee meter hoogte boven een vlak open gebied met een ruwheidslengte van 0,03 meter (aanhangsel 9)	(m/s)

Thunnissen heeft met het TERGRA-model voor verschillende gewassen de constanten a en b berekend, weergegeven in tabel 2. De gevonden waarden mogen alleen worden toegepast als gevlogen is op de zogenaamde standaarddagen (Thunnissen, 1984).

Gevlogen is op heldere dagen bij een wolkenloze hemel en rustig weer. In dit onderzoek kunnen alle drie de vluchtdagen gezien worden als standaarddagen. Voor de drie vluchtdagen worden vervolgens de waarden voor  $B^r$  berekend (tabel 3).

**Tabel 2** Waarden voor de coëfficiënten *a* en *b* voor verschillende gewastypen en -hoogten (Thunnissen, 1984)

gewas	hoogte (cm)	<i>a</i> (1/K)	<i>b</i> (s/Km)
gras I < 15 cm	10	0,050	0,010
gras II > 15 cm	20	0,050	0,017
aardappelen	60	0,050	0,023
suikerbieten	60	0,050	0,023
granen	100	0,090	0,030
maïs	200	0,100	0,047

**Tabel 3** Berekende waarden voor de windsnelheid op twee meter hoogte, *u*(2), en de empirische coëfficiënt, *B'*, bij gras en maïs op drie vluchtdagen

vluchtdag	gewas	<i>a</i> (1/K)	<i>b</i> (s/Km)	<i>u</i> (2) (m/s)	<i>B'</i> (1/K)
25 mei	gras I	0,050	0,010	2,346	0,0735
	gras II	0,050	0,017	2,205	0,0875
	maïs	0,100	0,047	1,548	0,1728
19 juni	gras I	0,050	0,010	1,955	0,0696
	gras II	0,050	0,017	1,838	0,0812
	maïs	0,100	0,047	1,290	0,1606
29 juli	gras I	0,050	0,010	2,737	0,0774
	gras II	0,050	0,017	2,573	0,0937
	maïs	0,100	0,047	1,806	0,1849

**bepaling de temperatuur van een potentieel verdampend gewas  $T_c^*$**

De waarde voor de temperatuur van een potentieel verdampend gewas moet voor iedere vluchtdag, en voor ieder gewas, worden vastgesteld. Voor de bepaling van deze temperatuur is nog geen standaardprocedure voor handen. Om tot een juiste keus te komen wordt gebruik gemaakt van de volgende gegevens:

- luchtfoto's;
- grondwatertrappenkaart;
- de luchttemperatuur gemeten door het KNMI ten tijde van de opname.

Gezocht wordt naar een perceel waar met een grote waarschijnlijkheid het gewas potentieel verdampt. Binnen dit perceel wordt een gemiddelde waarde bepaald. Deze waarde kan als  $T_c^*$  dienen voor dat gewas. In eerdere onderzoeken (Thunnissen, 1984; Bijkerk, 1990) is vastgesteld dat de  $T_c^*$  van maïs ongeveer gelijk is aan de luchttemperatuur. De maïs moet dan echter wel volgroeid zijn. De  $T_c^*$  van kort gras is enkele graden hoger dan die van maïs. Hoog- en middelhoog gras hebben referentietemperaturen die hier tussenin liggen. De gebruikte waarden voor de referentietemperaturen van de verschillende gewassen voor de drie vluchtdagen zijn weergegeven in tabel 4. De gebruikte procedures binnen ERDAS worden besproken in aanhangsel 10.

**Tabel 4** De waarden voor de referentietemperatuur  $T_c^*$  van de verschillende gewassen voor de drie vluchtdagen ( $^{\circ}\text{C}$ )

vluchtdag	gras < 5	gras 5 - 15	gras > 15	maïs	$T_{\text{lucht}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
25 mei	28,6	27,4	25,2	-	25,3
19 juni	29,8	28,4	27,0	-	25,7
29 juli	28,4	27,2	25,8	24,7	25,0

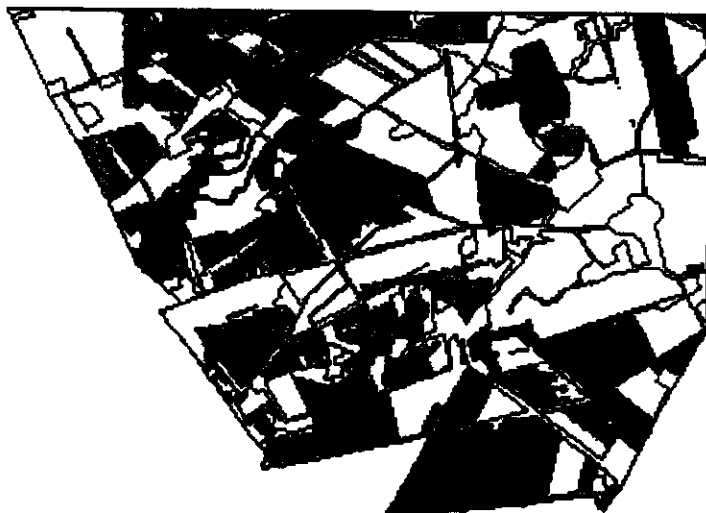
In tabel 4 is voor de dagen 25 mei en 19 juni geen  $T_c^*$  gegeven voor maïs, omdat de bedekkingsgraad dan nog kleiner is dan 90 procent.

#### 4.4 Berekende verdampingsreducties

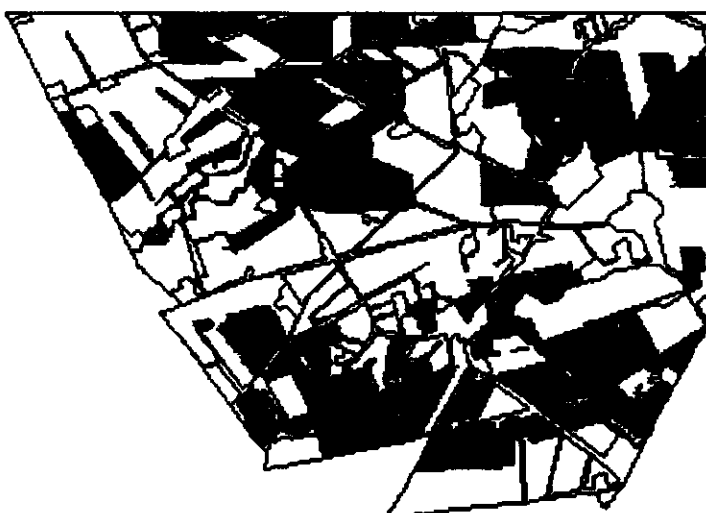
In figuur 10 staan de verdampingsreducties weergegeven zoals deze berekend zijn in Mander met vergelijking (6).



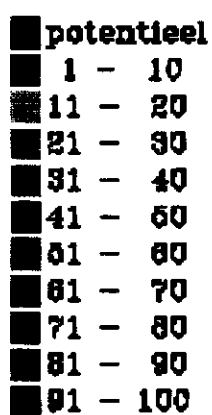
25 mei



19 juni



29 juli



*Fig. 10 Verdampingsreducties berekend op 25 mei, 19 juni en 29 juli met remote sensing-beelden*

## 5 VALIDATIE VAN GESIMULEERDE VERDAMPINGSREDUCTIES MET REMOTE SENSING

### 5.1 Mogelijke oorzaken van verschil in verdampingsreducties

Met het hydrologisch model MUST zijn de verdampingsreducties voor 1989 gesimuleerd. Van de gesimuleerde verdampingsreducties op de vluchtdagen zijn kaarten gemaakt, weergegeven in figuur 7. Door combinatie van veldwaarnemingen met de remote sensing-opnamen zijn eveneens kaarten vervaardigd, figuur 10, die de verdampingsreducties van het proefgebied op verschillende vluchtdagen weergeven.

De verkregen verdampingsreducties berekend met het hydrologisch model MUST en met remote sensing-beelden worden vergeleken op hun overeenkomsten en verschillen. Voor eventuele verschillen zijn er factoren aan te wijzen die kunnen zijn ontstaan bij:

- de veldinventarisatie;
- de simulatie van de verdampingsreducties;
- het verwerken van de remote sensing-beelden.

Fouten in de veldinventarisatie die verschillen in uitkomst tussen de twee berekende verdampingsreducties teweeg brengen, zijn niet of nauwelijks na te trekken. Zo wordt bij de invoer voor MUST naar de effectieve wortelzone gevraagd. Een verkeerde schatting bij de veldinventarisatie van deze wortelzone heeft tot gevolg dat de vochtleverantie niet overeenkomt met de werkelijkheid. Het is immers niet meer na te gaan of een bepaald perceel al dan niet voor 90 procent bedekt is geweest en of de hoogte van het gras juist is geschat. Wanneer een perceel voor minder dan 90 procent bedekt is, gaat de uitstraling van de bodem een grote rol spelen. Indien dit perceel in het veld is geïnventariseerd met een bedekkingsgraad van 90 procent, zullen de berekende verdampingsreducties met remote sensing een overschatting zijn van de in werkelijkheid optredende reducties. De gewashoogte speelt bij het omrekenen van temperatuurverschillen naar verdampingsreducties met remote sensing eveneens een belangrijke rol. Bij een gecorrigeerde windsnelheid van 3,0 meter per seconde is de calibratie-coëfficiënt  $B'$  voor middelhoog gras van 5 tot 15 centimeter gelijk aan 0,08 en voor gras langer dan 15 centimeter 0,101 (paragraaf 4.3.5). Per graad temperatuurverschil tussen een actueel en potentieel verdampend gewas is het verschil in verdampingsreductie van middelhoog gras en lang gras ongeveer 2 procent. Met de thermische video zijn temperatuurverschillen gemeten van 15 tot 20 °C. De gemaakte kleurenfoto's bieden geen houvast om een eventuele fout in de inventarisatie te corrigeren. In het vervolg is het raadzaam om gelijktijdig false color-foto's te maken van het opnamegebied, omdat deze foto's meer informatie geven over de leaf area-index. Hiermee wordt informatie verkregen over de bedekkingsgraad van de bodem en indirect over de gewashoogte (mond. med. Mulders en Nieuwenhuis, maart 1991).

Het berekenen van verdampingsreducties met het hydrologisch model MUST vraagt om verscheidene invoergegevens (hoofdstuk 3). De effectieve wortelzone en de onderrandvoorwaarde zijn twee gevoelige invoerparameters van het model. De effectieve wortelzone bepaalt de hoeveelheid beschikbaar vocht voor het gewas. De grondwaterstand heeft grote invloed op de capillaire nalevering van de ondergrond aan de plant. De effectieve wortelzone is alleen voor gras (engels raaigras) geïnventariseerd en gegeneraliseerd per kaartvlak. Voor maïs is een schatting gemaakt

van de dikte van de effectieve wortelzone naar aanleiding van de dikte van de effectieve wortelzone van gras dat op dezelfde bodemsoort en grondwatertrap groeit (paragraaf 3.2.1). Door deze generalisatie en schatting kunnen fouten geïntroduceerd worden. Daarnaast kan de generalisatie van de grondwaterstanden leiden tot de introductie van fouten.

Remote sensing-beelden geven de momentane temperatuurverschillen in het veld weer. Het omzetten van deze temperatuurverschillen in verdampingsreducties geeft dan een goed beeld van hoe het gewas zich in het veld gedraagt. Echter, voordat de temperatuurverschillen berekend worden, moeten stappen genomen worden, waarin fouten kunnen worden geïntroduceerd:

- de pixelwaarden worden omgezet met een te bepalen lineaire relatie naar gewastemperaturen;
- de calibratie constante  $B^r$  wordt afgeleid van gewastype, gewashoogte en een gecorrigeerde windsnelheid;
- de bepaling van de temperatuur van een potentieel verdampend gewas vindt plaats aan de hand van luchtfoto's, thermische video-opnamen en ervaring van de onderzoeker.

Bij het valideren van de berekende verdampingsreducties met het hydrologisch model MUST en de berekende verdampingsreducties met remote sensing in Mander wordt niet gekeken naar de fouten die eventueel geïntroduceerd zijn door de inventarisatie, de berekeningen en de bewerkingen. Aan de berekeningen voor alle geselecteerde percelen en kaartvlakken zal hierdoor dezelfde waarde worden gehecht.

## 5.2 Validatie criteria

Met remote sensing wordt voor elke afzonderlijke pixel de verdampingsreductie berekend. De verdampingsreducties verkregen uit het hydrologisch model MUST zijn berekend voor elk afzonderlijk kaartvlak in het gebied. Om tot een goede vergelijking te komen van de twee verdampingsreductiekaarten worden de verdampingsreducties bepaald uit de remote sensing-beelden vereffend per kaartvlak. Het computerprogramma OBDREN, Object Classification Drenthe (ontwikkeld door Janssen, DLO-Staring Centrum, 1991), berekent voor elk kaartvlak de gemiddelde verdampingsreductie met de daarbij behorende standaardafwijking. Deze vereffende verdampingsreductie per kaartvlak wordt weergegeven in figuur 11.

De twee verdampingsreductiekaarten geven nu per kaartvlak elk een waarde voor de verdampingsreductie. Om tot een vergelijking van de resultaten te komen is het absolute verschil tussen de verdampingsreductie berekend met MUST, en de verdampingsreductie berekend met remote sensing, bepaald. Figuur 12 geeft dit absolute verschil in verdampingsklassen weer.

De gesimuleerde verdampingsreducties met MUST en de met vereffende remote sensing verkregen verdampingsreducties zijn nu vergeleken per kaartvlak voor:

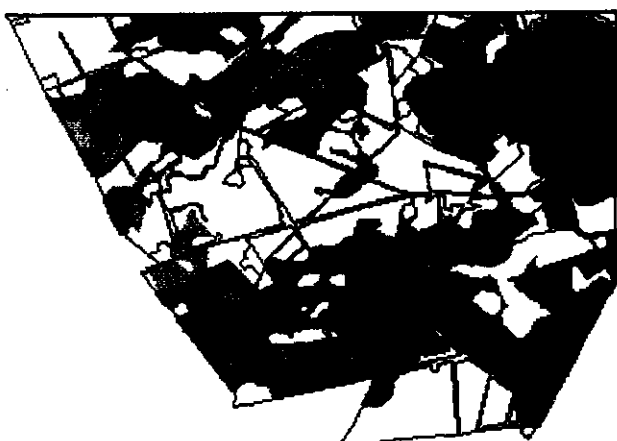
- bodemeenheden; een bodemeenheid is een verzameling kaartvlakken met dezelfde combinatie van bodemsoort en grondwatertrap (tabel 5);
- bodemsoort zoals weergegeven op de bodemkaart schaal 1 : 10 000 (tabel 6);
- grondwatertrap zoals weergegeven op de grondwatertrappenkaart schaal 1 : 10 000 (tabel 7).

gemiddelde

standaardafwijking



25 mei



19 juni



29 juli

- potentieel
- 1 - 10
  - 11 - 21
  - 21 - 30
  - 31 - 40
  - 41 - 50
  - 51 - 60
  - 61 - 70
  - 71 - 80
  - 81 - 90
  - 91 - 100

- 0 klassen
- 1 klasse
- 2 klassen
- 3 klassen
- 4 klassen

*Fig. 11 De gemiddelde verdampingsreductie per kaartvlak voor de remote sensing-opname met daarnaast de bijbehorende standaardafwijking*

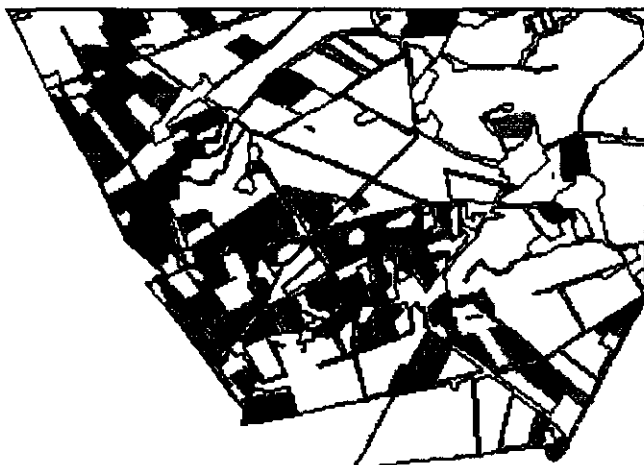
**Tabel 5** *Vergelijking van verdampingsreducties per kaartvlak voor de bodemeenheden op de vluchtdagen*

combinatie bodem - gt	aantal vlakken	25 mei voldoet	voldoet niet	19 juni voldoet	voldoet niet	29 juli voldoet	voldoet niet
Hn51 VII	1	0	0	0	0	1	0
Hn53 III*	3	1	0	1	0	2	0
Hn53 V*	25	8	5	3	4	14	4
Hn53 VII*	8	0	0	0	0	3	2
Hn53 V	4	1	0	0	0	2	1
Hn53 VI	43	9	19	10	12	17	11
Hn53 VII	26	7	5	6	3	11	4
cHn53 VII*	1	0	0	0	0	0	0
cHn53 VI	6	2	0	1	2	0	4
cHn53 VII	6	1	0	2	1	2	1
cZn53 III*	1	0	0	0	0	0	0
cZn53 V*	1	0	1	0	1	1	0
cZn53 VII*	1	0	0	0	0	1	0
cZn53 VI	2	1	0	0	1	1	1
cZn53 VII	4	2	0	1	1	4	0
tZn53 III*	12	7	0	1	2	10	0
tZn53 V*	16	3	3	4	5	11	1
tZn53 III	1	0	0	0	0	0	0
tZn53 V	1	0	0	0	0	0	1
tZn53 VI	4	1	2	1	2	2	0
tZn53 VII	2	0	0	0	0	1	0
tZn55 V*	3	2	1	0	1	1	2
tZn55 VI	1	0	1	0	1	1	0
tZg55 III*	3	2	1	1	0	3	0
tZg55 V*	4	0	2	1	1	4	0
tZg55 III	2	2	0	1	0	2	0
tZg55 V	1	1	0	0	0	1	0
tZg55 VI	3	1	1	1	1	1	0
zEZ53 VII*	7	1	0	1	3	3	0
zEZ53 VI	4	1	3	1	0	2	1
zEZ53 VII	10	2	5	4	3	6	1
dzEZ53 VII*	5	0	0	2	1	4	0
zWz III*	3	0	2	1	1	1	1
zWz III	1	1	0	1	0	0	0
zWz VI	1	0	0	0	0	0	0
<b>totaal</b>	<b>216</b>	<b>56</b>	<b>51</b>	<b>44</b>	<b>46</b>	<b>112</b>	<b>35</b>

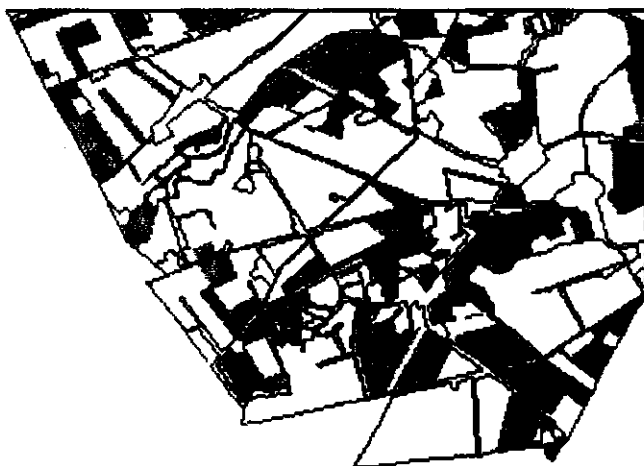
**Tabel 6** *Vergelijking van de verdampingsreducties per kaartvlak voor de bodemsoorten op de vluchtdagen*

bodemsoort	aantal kaartvlakken	25 mei voldoet	voldoet niet	19 juni voldoet	voldoet niet	29 juli voldoet	voldoet niet
Hn51	1	0	0	0	0	1	0
Hn53	109	26	29	20	19	49	22
cHn53	13	3	0	3	3	2	5
cZn53	9	3	1	1	3	7	1
tZn53	36	11	5	6	9	24	2
tZn55	4	2	2	0	2	2	2
tZg55	13	6	4	4	2	11	0
zEZ53	21	4	8	6	6	11	2
dzEZ53	5	0	0	2	1	4	0
zWz	5	1	2	2	1	1	1
<b>totaal</b>	<b>216</b>	<b>56</b>	<b>51</b>	<b>44</b>	<b>46</b>	<b>112</b>	<b>35</b>

25 mei



19 juni



29 juli



- 0 klassen
- 1 klasse
- 2 klassen
- 3 klassen
- 4 klassen
- 5 klassen
- 6 klassen
- 7 klassen

*Fig. 12 Het absolute verschil in verdampingsreducties tussen de MUST en de remote sensing-berekening*

**Tabel 7** *Vergelijking van de verdampingsreducties per kaartvlak voor de grondwatertrappen op de vluchtdagen*

grond- watertrap	aantal kaartvlakken	25 mei voldoet	voldoet niet	19 juni voldoet	voldoet niet	29 juli voldoet	voldoet niet
III*	22	10	3	4	3	16	1
V*	49	13	12	8	12	31	7
VII*	22	1	0	3	4	11	2
III	4	3	0	2	0	2	0
V	6	2	0	0	0	3	2
VI	64	15	26	14	19	24	17
VII	49	12	10	13	8	25	6
<b>totaal</b>	<b>216</b>	<b>56</b>	<b>51</b>	<b>44</b>	<b>46</b>	<b>112</b>	<b>35</b>

Bij het valideren op bodemfysische eenheden is gekeken naar de combinatie van bodemsoort en grondwatertrap. Vervolgens is afzonderlijk gekeken naar de bodemsoorten en de grondwatertrappen.

Wanneer het absolute verschil tussen de verdampingsreducties minder of gelijk aan twee verdampingsklassen is, wordt dit beschouwd als een goede overeenkomst tussen de twee berekende verdampingsreducties (mond. med. Nieuwenhuis, maart 1991). Wanneer binnen een kaartvlak slechts een deel van een geselecteerd perceel voorkomt, is aangenomen dat dat perceel representatief is voor het gehele kaartvlak. Figuur 13 geeft een visueel overzicht voor de drie vluchtdagen naar de overeenkomst in berekening. Voor de vluchtdagen in mei en juni is niet gevalideerd voor maïs omdat in die periode de maïs niet volgroeid is (paragraaf 4.3.5).

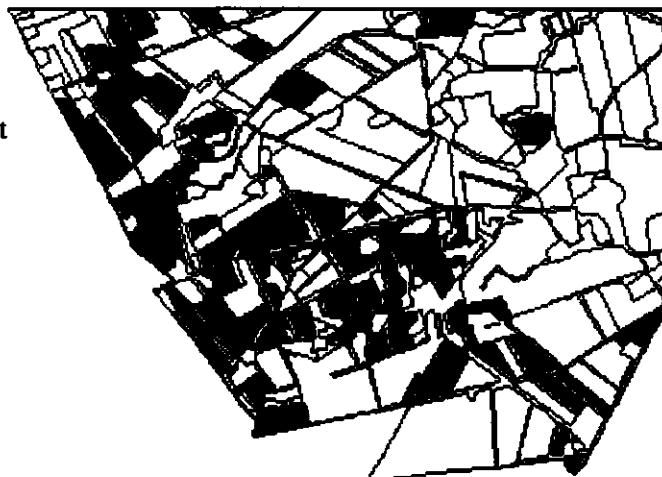
Naast de vergelijking per kaartvlak voor verschillende items is gekeken of de overeenkomsten dan wel verschillen tussen de twee bepalingen afhankelijk zijn van het gewas dat op een bepaald perceel groeit. Laag gras, middelhoog gras en hoog gras zijn naast maïs, als afzonderlijke gewassen beschouwd. Wanneer een perceel in twee kaartvlakken ligt en in het ene kaartvlak voldoet de berekende verdampingsreductie van het perceel wel aan het gestelde criterium en in het andere kaartvlak voldoet deze niet aan het gestelde criterium, dan wordt een uitspraak gedaan indien 75 procent wel of niet voldoet. De resultaten staan vermeld in tabel 8.

**Tabel 8** *Vergelijking van de verdampingsreducties aan de hand van de gewassenkaart op de vluchtdagen*

gewas	25 mei voldoet	voldoet niet	19 juni voldoet	voldoet niet	29 juli voldoet	voldoet niet
gras < 5	12	10	5	2	23	4
gras 5 - 15	21	16	19	17	43	9
gras > 15	11	15	20	21	26	3
maïs	-	-	-	-	23	2
<b>totaal</b>	<b>44</b>	<b>41</b>	<b>44</b>	<b>40</b>	<b>115</b>	<b>18</b>

25 mei

overlay is de  
gewassenkaart



19 juni

overlay is de  
harde achtergrond



29 juli

overlay is de  
vlakkenkaart



■ voldoet  
■ voldoet niet

*Fig. 13 Kaartvlakken die wel of niet voldoen aan het gestelde criterium van maximaal twee verdampingsklassen verschil voor de drie vluchtdagen*



### 5.3 Bespreking van de resultaten

Uit tabel 5 tot en met 8 blijkt dat voor juli de resultaten het meest eenvoudig te interpreteren zijn. Er lijkt een duidelijke overeenkomst te zijn tussen de verdampingsreducties berekend met MUST en de verdampingsreducties berekend met remote sensing in Mander. Bij de resultaten is alleen gekeken naar bodemeenheden, grondwatertrappen en bodemsoorten die minimaal in 4 kaartvlakken voorkomen die geselecteerd zijn. Deze keus is arbitrair. Binnen de verschillende tabellen vallen de volgende zaken op voor 29 juli:

- de bodemeenheden
  - bodemeenheden die voor meer dan 75% voldoen:
    - Hn53 V\*
    - cZn53 VII
    - tZn53 III\*
    - tZn53 V\*
    - tZg55 V\*
    - zEZ53 VII\*
    - dzEZ53 VII\*.
  - één bodemeenheid die voor minder dan 25% voldoet:
    - cHn53 VI.
- de bodemsoorten
  - bodemsoorten die voor meer dan 75% voldoen:
    - tZn53
    - cZn53
    - tZg55
    - zEZ53.
- de grondwatertrap
  - grondwatertrappen die voor meer dan 75% voldoen:
    - III\*
    - V\*
    - VII\*
    - VII.

De resultaten van 25 mei en 19 juni zijn veel minder duidelijk. Dit komt doordat:

- er veel minder geselecteerde percelen zijn, omdat de bedekkingsgraad van alle maïspercelen kleiner is dan 90%;
- de verhouding tussen het aantal kaartvlakken die aan het gestelde criterium voldoen en het aantal kaartvlakken die niet aan het criterium voldoen, ongeveer één op één is.

Voor alle drie de vluchtdagen lijkt het of de bepaling van de verdampingsreducties voor kaartvlakken met een grondwatertrap VI moeilijk is wegens mogelijk een tijdelijk grondwaterprofiel. De capillaire nalevering speelt vaak geen rol in de vochtvoorziening van het gewas.

- de gewassoort
  - de gewassoort lijkt niet van invloed te zijn op de nauwkeurigheid waarmee verdampingsreducties bepaald kunnen worden.

## 6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 6.1 Conclusies

In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van de validatie gedetailleerd besproken. Hieruit bleek dat nog niet in alle gevallen eenduidige uitspraken konden worden gedaan omtrent bepaalde fysische bodemeenheden, bodemsoorten en grondwatertrappen waar de beide berekeningsmethoden elkaar ondersteunen of tegenspreken. De verdampingsreductiebeelden van 29 juli ondersteunen dat beide methoden de verdampingsreductie hetzelfde berekenen, binnen het gestelde criterium van 2 verdampingsklassen. De verdampingsreductiebeelden van 25 mei en 19 juni ondersteunen deze conclusie echter niet.

Er is geen verschil in overeenkomst afhankelijk van het gewas. De gewassoort en hoogte van het gras lijken niet van invloed te zijn op de nauwkeurigheid waarmee verdampingsreducties met remote sensing bepaald kunnen worden.

De operationele mogelijkheden van de relatief goedkope toepassing van thermische video-apparatuur blijkt mogelijk te zijn voor kleine gebieden. Voor grote gebieden is deze methode veel te bewerkelijk en zal er naar andere, duurdere remote sensing-technieken gekeken worden.

Door gebruik te maken van thermische video-opnamen blijkt temporele vergelijking mogelijk. Het voordeel is dat nu kritischer gekeken kan worden naar de verkregen resultaten. Als het onderzoek zich beperkt zou hebben tot 29 juli waren de conclusies stelliger uitgevallen.

Remote sensing-opnamen zijn gedetailleerder dan de berekeningen met een hydrologisch model. Uit het hydrologisch model wordt een unieke waarde per kaartvlak verkregen, terwijl uit het remote sensing-beeld de verdampingsreducties per kaartvlak door verscheidene pixels wordt weergegeven, waardoor inzicht kan worden verkregen in de variaties per kaartvlak. Het is eenvoudiger de gedetailleerde informatie van de remote sensing-opnamen te vereffenen dan de hydrologische berekeningen voor kleinere oppervlakken uit te voeren. Vergelijking van de gevonden waarden is dan mogelijk. Het is dus belangrijk van tevoren te bepalen op welke schaal de berekeningen met het hydrologisch model worden uitgevoerd. Dit is echter mede gebonden aan de schaal van de bodemkaart die beschikbaar is voor het te onderzoeken gebied.

### 6.2 Aanbevelingen

De verdampingsreducties berekend met MUST en de verdampingsreducties berekend met thermische video-opnamen zijn in dit onderzoek vergeleken per kaartvlak door te onderzoeken of het absolute verschil tussen de beide verdampingsreducties **kleiner** dan wel **groter** is dan een bepaald criterium. Deze vergelijking kan echter ook op andere manieren plaatsvinden, zoals door:

- in plaats van het dimensieloos begrip kaartvlak met werkelijke oppervlakten te rekenen; hierdoor wordt een kaartvlak dus belangrijker, naarmate de oppervlakte van dat kaartvlak groter is;
- niet meer kijken naar het absolute verschil, maar naar het werkelijke verschil waardoor inzicht kan worden verkregen of één van de twee berekeningsmethoden systematisch hogere dan wel lagere verdampingsreducties berekent.

Bij het berekenen van verdampingsreducties kunnen fouten optreden bij zowel de berekeningen met het hydrologisch model MUST als bij de remote sensing bewerkingen. Deze fouten zijn een gevolg van:

- hydrologische berekening
  - fouten in de invoergegevens;
  - fouten in het model.
- thermische video opnamen
  - fouten bij de inventarisatie;
  - fouten bij de digitalisatie;
  - fouten bij de beeldverwerking.

Het is raadzaam een onderzoek te doen naar de invloed van deze fouten op de eindresultaten. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan:

- het onderzoeken of het hydrologisch model snel genoeg reageert op veranderingen; verdampingsreducties kunnen snel toe- en afnemen;
- een gedetailleerde vergelijking van luchtfoto's, veldinventarisatie en resultaten;
- door gebruik te maken van false color-luchtfoto's, waarmee inzicht kan worden gekregen over de bedekkingsgraad (leaf area-index);
- een onderzoek waarbij eenvoudig aan de verdeling van de pixelwaarden de bruikbaarheid van thermische video-opnamen te bepalen is: opvallend is dat de histogrammen van de pixelwaarden van de geselecteerde graspercelen op 25 mei en 19 juni veel uitgestrekter en afgevlakter zijn dan het histogram van 29 juli;
- het komen tot een duidelijke omschrijving van de zogenaamde standaarddagen in termen als: zoveel meter zicht en windsnelheid;
- het ontwikkelen van een standaardprocedure voor de bepaling van  $T_c^*$ .

Om achter een duidelijk verschil in resultaat voor een bodemeenheid te komen, is een grondige analyse aan te bevelen naar het verschil. Hierbij dient zowel naar het hydrologisch model als naar de bewerkingen met de remote sensing-beelden te worden gekeken. In het geval van het hydrologisch model kan gedacht worden aan de invloed van de variatie in cultuurdek van 30 tot 50 centimeter bij een humuspodzol, of in het geval van remote sensing-beeldverwerking wat de invloed is van kopeinden of ruggen in het veld.

Omdat de veldinventarisatie een belangrijke rol speelt bij de berekeningen, kan gedacht worden aan richtlijnen voor dergelijke inventarisaties. Volgens deze richtlijnen kunnen dan inventarisaties worden uitgevoerd, waarbij de gegevens zo exact mogelijk worden verzameld.

## LITERATUUR

- Ad hoc groep verdamping, 1984. *Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model GELGAM*. Arnhem. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer.
- Agema infrared systems, 1985. *Operating manuel*. Agema infrared systems.
- Bijkerk, A.J., 1990. *Hydrologisch onderzoek Gasselternijveen met behulp van remote sensing en hydrologische modellen*. Wageningen, Staring Centrum.
- Bregt, A.K., J.G.R. Beemster, 1987. "Accuracy in predicting moisture deficits and changes in yield from soil maps". STIBOKA, Wageningen, *Geoderma* 43, 4: 301-310.
- Bruin, H.A.R. de, A.A.M. Holtslag, 1987. *Evaporation and weather*. 's-Gravenhage, Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO.
- Carlson, T.N., E. Buffum, 1989. "On estimation total daily evapotranspiration from remote surface temperature measurements". *Remote Sens. Environ.* 29: 197-207.
- Dijkstra, I., 1988. *Validatie van gesimuleerde verdampingsreducties met behulp van remote sensing*. Leeuwarden.
- Environmental Systems Research Institute, Inc., 1989. *PC ARC/INFO starter-kit, ARC/INFO users guide volume 1, ARC/INFO users guide volume 2, ARCEDIT users guide, ARC/PLOT users guide, AML users guide*. Environmental Systems Research Institute, Inc., California, USA.
- ERDAS Inc., 1989. *ERDAS PC user's guide modules*. ERDAS Inc..
- Gurney, R.J., P.J. Camillo, 1984. "Modelling daily evapotranspiration using remotely sensed data". *J. Hydrol.* 69: 305-324.
- Jackson, R.D., R.J. Reginato, S.B. Idso, 1977. "Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements". *Water Resour. Res.* 65(3): 651-656.
- Krabbenborg, A.J., 1983. *Standaard-vocht karakteristieken van zandgronden en veenkoloniale gronden*. Wageningen, STIBOKA, Rapport nr. 1680.
- Laat, P.J.M. de, 1985. *MUST - A simulation model for unsaturated flow*. Delft, International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Report series no. 16.
- Laat, P.J.M. de, 1989. *MUST, version 2.0 - A simulation model for unsaturated flow*. Delft, International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering.
- Linden, H.T.M. van der, 1990. *ARC/INFO gebruikershandleiding*. Wageningen, Staring Centrum, Interne mededeling 54.

- Monteith, J.L., 1973. *Principles of environmental physics*. London, Edward Arnold.
- Nieuwenhuis, G.J.A., E.H. Smidt, H.A.M. Thunnissen, 1985. "Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images". Wageningen, *Int. J. Remote Sens.* 8: 1319-1334, ook in Techn. Bull. 37 ICW.
- Priestly, C.H.B., R.J. Taylor, 1972. "On the assesement of surface flux and evapotranspiration using large scale parameters". *Mon. Weather Rev.* 10: 81-92.
- Rijtema, P.E., 1971. *Een berekeningsmethode voor de benadering van landbouwschade ten gevolge van grondwateronttrekking*. Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Nota nr. 587.
- Rosema, A., J.H. Bijlveld, P. Reiniger, G. Tassone, K. Blijth, R.J. Gurney, 1978. "Tell-us, A combined surface temperature, soil moisture and evapotranspiration mapping approach". *Proc. 12th Int. Symp. Rem. sens. of Environ., Envir. Res. Inst. of Michigan.*: 2267-2276.
- Seguin, B., B. Itier. "Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal ir data". *Int. J. Remote Sens.* 4: 371-381.
- Soer, G.J.T., 1977. *The TERGRA model: a mathematical model for the simulation of the daily behaviour of crop surface temperature and actual evapotranspiration*. Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Nota 1014.
- Stoffelsen, G.H., A.F. van Holst, 1985. *Bodemkundig-hydrologisch onderzoek in het waterwingebied Mander, fase II: de bodemgesteldheid, de voormalige en huidige hydrologische situatie en de grondwaterstandsverlaging*. Wageningen, STIBOKA Rapport nr 1807.
- Thom, A.S., H.R. Oliver, 1977. "On Penman's equation for estimating regional evaporation". *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 96: 67-90.
- Thunnissen, H.A.M., 1984. *Remote sensing studieproject oost-Gelderland, deelrapport 6: eenvoudige methode voor de bepaling van de regionale gewasverdamping*. Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding. Nota 1580.
- Thunnissen, H.A.M., M.P. Siemonsma, 1987. *Hydrologische effecten van berekening uit het grondwater in een studiegebied in west en midden Noord-Brabant*. Bilthoven, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne. Rapport nr. 840358002.
- Thunnissen, H.A.M., G.J.A. Nieuwenhuis, 1988. "An application of remote sensing and soil water balance simulation models to determine the effect of groundwater extraction on crop evapotranspiration". *Agricultural Water Management*, 15/4: 315-332.
- TNO, 1988. *Van Penman naar Makkink een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen. Eindrapport van de project- en begeleidingsgroep verdampingsberekeningen*. 's-Gravenhage. Rapporten en nota's no. 19.

Topografische Dienst Nederland, 1987. *Topografische kaart van Nederland, blad 28e noord en blad 28f noord, schaal 1 : 10 000*. Emmen, Topografische Dienst Nederland.

Wieringa, J., P.J.M. van der Veer, 1976. *Nederlandse weerstations 1971-1974*. De Bilt. KNMI, verslagen V-278.

Wieringa, J., P.J. Rijkoort, 1983. *Windklimaat van Nederland*. Den Haag. Klimaat van Nederland: no. 2. Staatsuitgeverij.

Wösten, J.H.M., M.H. Bannink, G.H. Stoffelsen, S.G.M. Borst, A.F. van Holst, J. Bouma, 1987. "Vergelijking van opbrengstveranderingen als gevolg van waterontrekking, berekend op vier kaartschalen". *Cultuurtechnisch Tijdschrift* 26, 6: 403-414.

## AANHANGSEL 1

### BESCHRIJVING INVOERFILE VOOR MUST

Voor ieder kaartvlak is een invoerfile gemaakt, waarmee de verdampingsreducties van het betreffende kaartvlak berekend zijn. Binnen één kaartvlak kunnen verschillende percelen met verschillende gewassen bebouwd zijn. In het onderzoeksgebied worden hoofdzakelijk gras- en maïspercelen aangetroffen. Voor deze twee gewassen worden de verdampingsreducties berekend per kaartvlak uitgerekend. De invoerfiles voor de berekening van de verdampingsreducties verschillen voor de beide gewassen. Maïs wortelt dieper dan gras en heeft een ander groeipatroon. Per kaartvlak dienen dan ook twee invoerfiles voor MUST geselecteerd te worden, als de beide gewassen in dat betreffende kaartvlak aanwezig worden. In dit aanhangsel zal de setup van twee invoerfiles besproken worden voor het kaartvlak 303. De keuze van dit kaartvlak is arbitrair. Voor een uitgebreide beschrijving van de invoergegevens voor MUST wordt verwezen naar De Laat (1985). In de figuren 14 en 15 staan de invoerfiles weergegeven voor het kaartvlak 303. De inhoud van deze invoerfiles voor kaartvlak 303 wordt hieronder besproken.

---

INVOERFILE VAN KAARTVLAK	303
2 3 0 1 148 1	
94.24 22.48 11.63 7.16 3.235.0E-19.2E-31.2E-32.9E-45.9E-52.2E-58.9E-65.4E-6	
385 358 344 332 310 217 119 92 76 62 53 46 41 40 1	
169.90 54.54 22.29 10.36 3.052.8E-13.5E-35.4E-41.5E-43.3E-51.1E-54.4E-62.2E-6	
356 319 305 288 248 134 67 46 36 27 22 19 16	
9999	
460 430 420 410 370 300 220 180 140 110 90 80 70	WORTELZONE
1 30 1 1 61.	
0.000.09	
61	
0.000.15	
.....	
0.000.47	
105.	

---

**Fig. 14 Invoerfile voor de berekening van de verdampingsreducties met MUST voor een met gras begroeid perceel**

```

INVOERFILE VAN KAARTVLAK      303
  2  3  0  1 148  1

94.24 22.48 11.63  7.16  3.235.0E-19.2E-31.2E-32.9E-45.9E-52.2E-58.9E-65.4E-6
385 358 344 332 310 217 119  92  76  62  53  46  41  10  1
169.90 54.54 22.29 10.36  3.052.8E-13.5E-35.4E-41.5E-43.3E-51.1E-54.4E-62.2E-6
356 319 305 288 248 134  67  46  36  27  22  19  16
9999
460 430 420 410 370 300 220 180 140 110  90  80  70      WORTELZONE
385 358 344 332 310 217 119  92  76  62  53  46  41      WORTELZONE

  0  0      1  3  61.
  1 30  2  60
0.000.00
  61.
.....
0.000.57
105.

```

Fig. 15 Invoerfile voor de berekening van de verdampingsreductie met MUST voor een met maïs begroeid perceel

gras

regel	parameter	waarde	opmerking
	<i>algemene invoergegevens</i>		
1	tekstregel		
	nummer kaartvlak	303	kaartvlak nummer 303
2	type bovenrandvoorwaarde	2	potentiële evapotranspiratie is gegeven
	type onderrandvoorwaarde	3	grondwaterstand is gegeven
	printen verzadigingstekortcurves	0	nee
	tijdstaplengte in dagen	1	één dag
	totaal aantal tijdstappen	148	148 dagen
	aantal gevallen	1	één geval
3	einde invoer algemene gegevens		
	<i>bodemfysische gegevens ondergrond</i>		
4	doorlatendheidskarakteristiek		doorlatendheid bij 13
	laag één (cm/dag)		zuigspanningen
5	waterretentiecurve laag één		vochtgehalte bij 13
			zuigspanningen
	diepte onderkant laag beneden		
	de wortelzone	40	40 centimeter
	andere laag	1	ja



6	doorlatendheidskarakteristiek laag twee (cm/dag)		doorlatendheid bij 13 zuigspanningen
7	waterretentiecurve laag twee		vochtgehalte bij 13 zuigspanningen
8	einde invoer ondergrond	9999	
9	<i>gegevens van de wortelzone</i> waterretentiecurve wortelzone		vochtgehalte bij 13 zuigspanningen
10	lege regel		
11	welke waterretentiecurve	1	altijd maar één waterretentiecurve
	diepte wortelzone	30	30 centimeter
	type landgebruik	1	gras
	welke ondergrondtype hoort bij deze wortelzone	1	de hierboven beschreven ondergrond
	initiële grondwaterstand	61	61 centimeter beneden maaiveld
12	<i>meteorologische gegevens</i> neerslag (cm/dag) voor dag	0.00	nul centimeter
	potentiële evapotranspiratie (cm/dag) voor dag	0.09	negentiende millimeter
13	grondwaterstand dag	61	61 centimeter beneden maaiveld
enz.	regel 12 en 13 worden voor alle 148 dagen herhaald		

#### *maïs*

De opbouw van de invoerfile voor de berekening van de verdampingsreducties voor maïs is analoog aan de opbouw van de hierboven besproken invoerfile. Er zijn ook enige wijzigingen:

- Maïs wortelt dieper, zodat de wortelzone dikker wordt; namelijk 30 centimeter (hoofdstuk 3). De bovenste laag van de ondergrond wordt dan ook 30 centimeter dunner en is nu nog 10 centimeter dik (regel 5).
- De wortelzone bestaat nu uit twee lagen. Hiervoor gelden twee verschillende waterretentiecurves. De opbouw van de wortelzone wordt dan in een extra lijn weergegeven (regel 13). De eerste laag gaat tot 30 centimeter beneden maaiveld, en de tweede tot 60 centimeter beneden maaiveld.
- In regel 12 staat een 3 in plaats van een 1 in regel 10 van het eerste voorbeeld. Dit geeft aan dat het hier om een met maïs begroeide bodem gaat.
- De potentiële verdamping is anders, omdat de berekende waarde uit de Makkink-formule hier met andere gewasfactoren vermenigvuldigd wordt.

## AANHANGSEL 2

### VERDAMPINGSREDUCTIES BEREKEND MET MUST

In dit aanhangsel staan alle berekende verdampingsreducties weergegeven. Voor de berekening van de verdampingsreducties is gebruik gemaakt van vergelijking (8).

$$REDUCTIE = 100 \cdot \frac{E_{pot} - E_{act}}{E_{pot}} \quad (8)$$

waarin:  $E_{act}$  = actuele verdamping (mm/dag)  
 $E_{pot}$  = potentiële verdamping (mm/dag)

Voor alle kaartvlakken is eerst de verdampingsreductie berekend voor een oppervlak begroeid met gras. Daarna is op de gewaskaart gekeken binnen welke kaartvlakken maïs verbouwd wordt. Voor deze kaartvlakken is de verdampingsreductie ook berekend voor een oppervlak begroeid met maïs. Een kaartvlak is alleen in de onderstaande tabel opgenomen als verdampingsreductie optreedt binnen dat kaartvlak.

**Tabel 9** Berekende verdampingsreducties voor gras en maïs voor, op en na de vluchtdag per kaartvlak

kaartvlak	verdampingsreducties van gras van dag:									verdampingsreducties van maïs van dag:					
	144	145	146	169	170	171	209	210	211	169	170	171	209	210	211
98	4	10	12	33	39	42	30	36	31	0	0	0	17	22	19
143	24	28	32	44	50	54	35	39	39	0	0	0	21	24	25
153	28	33	37	54	59	64	40	42	46						
154	73	75	77	75	78	79	55	58	62						
199	71	78	81	69	76	81	45	52	54	42	46	52	54	60	63
202	24	28	32	48	52	58	40	42	46	6	9	14	42	43	44
203	29	33	37	52	57	61	40	42	46	4	9	14	42	43	44
204	0	2	7	52	56	62	45	48	46						
205	0	0	0	29	37	44	40	42	39	0	0	0	25	30	31
206	61	65	71	67	72	79	45	48	53	38	43	46	54	57	56
207	43	47	51	63	67	71	40	45	46	10	15	19	42	43	44
209	69	73	73	69	74	77	50	55	54	38	44	48	58	60	63
210	45	51	56	63	69	75	45	48	46	19	24	29	46	49	50
215	29	35	39	56	61	65	45	45	46						
216	37	41	44	63	70	75	40	45	46						
218	0	0	0	17	19	23	20	23	23						
222	28	31	34	44	48	52	35	39	39						
232	8	12	15	38	43	46	35	39	39	0	0	0	25	27	25
233	16	22	24	44	50	54	35	39	39						
234	4	18	24	60	67	73	50	55	54	0	0	0	42	46	44
235	0	0	0	0	6	8	15	19	15	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	6	5	10	8						
241	10	14	17	38	44	48	30	32	31						
242	12	16	20	35	41	44	30	32	31						
2441	26	29	34	48	54	58	40	42	39	0	0	2	33	35	38
2442	29	35	39	54	59	64	40	45	46	0	6	10	38	41	44
251	20	26	27	44	46	54	35	39	39	0	0	2	33	35	38
253	10	14	17	31	35	39	25	26	23	0	0	0	0	3	6
254	14	18	22	40	43	46	35	36	39	0	0	0	25	27	25
259	4	8	10	8	11	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
266	47	51	54	60	65	69	40	45	46						

kaartvlak	verdampingsreducties van gras van dag:									verdampingsreducties van maïs van dag:					
	144	145	146	169	170	171	209	210	211	169	170	171	209	210	211
2672	24	31	37	56	61	65	40	45	46						
269	12	18	20	48	54	58	40	42	46	0	0	0	29	35	38
270	0	0	0	0	0	0	5	7	8	0	0	0	0	0	0
273	0	0	0	13	19	27	15	19	15	0	0	0	0	0	0
274	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
275	0	0	0	0	6	10	10	13	15						
276	0	0	0	19	24	29	30	32	31						
277	18	22	24	50	54	58	40	45	46						
280	0	0	2	23	30	35	25	29	31						
283	0	0	0	4	9	14	0	0	0						
286	0	0	0	2	7	10	0	3	0	0	0	0	0	0	0
287	4	6	10	23	28	31	20	23	23	0	0	0	0	0	0
289	8	14	15	40	46	52	35	42	39						
290	0	0	0	23	28	33	25	29	31	0	0	0	0	0	0
291	2	6	10	25	32	35	25	26	23	0	0	0	8	11	13
295	16	18	20	31	35	39	30	29	31						
296	0	0	0	0	0	4	0	0	0						
298	0	0	0	0	4	10	0	0	0						
299	16	22	29	52	57	62	40	42	46	0	0	0	21	27	25
300	33	41	44	60	65	69	45	45	46	0	0	4	38	41	38
301	31	35	37	40	43	48	25	29	31	0	0	0	0	0	0
302	0	6	7	25	30	35	20	26	23						
305	29	35	37	50	56	62	40	42	39	0	0	2	29	32	31
306	61	65	68	67	74	79	45	52	54	10	17	23	50	51	50
307	47	53	56	60	65	69	45	48	54	2	6	12	46	49	50
308	0	0	0	19	26	31	15	16	15	0	0	0	0	0	0
311	35	39	42	54	61	67	40	42	39	0	4	10	38	41	38
312	4	10	12	35	43	48	30	36	39						
315	55	59	61	60	65	69	40	45	46						
316	16	18	20	33	37	40	25	29	31						
317	4	8	10	23	26	31	20	19	23						
319	0	0	0	0	0	2	0	0	0						
320	0	0	0	0	0	6	0	0	0						
322	0	0	0	6	11	15	15	19	15	0	0	0	0	0	0
325	0	0	0	0	6	12	15	19	15						
326	0	0	0	17	22	27	25	29	31						
328	41	47	49	54	57	62	40	45	46						
329	0	6	10	27	32	37	25	26	23						
330	0	0	0	0	0	0	10	13	15	0	0	0	0	0	0
331	0	0	0	2	7	14	10	13	8	0	0	0	0	0	0
332	0	0	0	0	0	0	5	10	8	0	0	0	0	0	0
334	18	22	27	48	54	58	40	42	46						
337	61	65	71	67	74	79	45	48	46	38	43	46	54	57	56
395	0	0	0	2	7	12	15	19	23	0	0	0	0	0	0
396	45	51	54	60	65	69	45	45	46	21	26	31	46	49	50
399	22	28	29	44	48	52	35	36	39	0	0	0	25	24	25
401	39	43	46	60	65	71	45	45	46						
402	39	45	49	56	61	65	40	42	46	0	0	0	29	32	31
403	10	14	17	38	44	48	30	32	31						
404	0	0	0	19	26	33	30	36	39	0	0	0	4	8	6
405	0	0	0	19	26	33	30	36	31	0	0	0	4	8	6
406	0	0	0	23	32	39	30	36	39						
407	4	8	12	31	35	40	30	32	31						
408	0	0	0	10	15	21	15	16	15	0	0	0	0	0	0
409	0	0	0	10	15	21	15	16	15	0	0	0	0	0	0
410	14	20	24	48	54	60	40	42	39	0	0	0	33	35	38
413	0	0	0	2	7	14	20	23	23	0	0	0	0	0	0
416	0	0	0	38	43	48	40	42	46	0	0	0	29	32	31
417	0	0	0	0	6	12	10	10	8	0	0	0	0	0	0
419	51	59	61	69	70	73	45	52	54	0	6	12	46	49	50
420	49	55	59	75	80	85	55	58	62						
421	75	77	78	73	76	79	55	61	62						
424	10	14	17	40	44	50	30	36	39						
426	69	71	73	71	74	77	50	55	54	31	37	42	50	54	56
427	71	75	76	73	76	79	50	55	54	31	37	42	50	54	56
428	39	43	46	58	63	65	40	45	46	15	19	23	42	46	44

Als bij maïs in tabel 9 niets vermeld wordt, wordt er geen maïs verbouwd binnen dit kaartvlak, zodat berekening van de verdampingsreductie achterwege is gelaten.

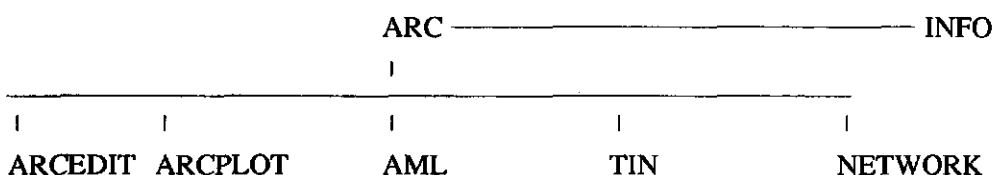
De gebruikte dagaanduiding start op 1 januari, dus:

- dag 145 is 25 mei
- dag 170 is 19 juni
- dag 210 is 29 juli.

## AANHANGSEL 3

### VERWERKEN VAN VELDGEGEVENS MET ARC/INFO

ARC/INFO is een uitgebreid Geografisch Informatie Systeem, GIS, een database waarin geografische gegevens zijn opgeslagen. Deze informatie kan op verschillende manieren bewerkt of gepresenteerd worden, bijvoorbeeld grafisch, op scherm of kaart, of via tabellen. Het ARC/INFO-pakket is opgebouwd uit verschillende modules. Schematisch ziet het pakket er als volgt uit:



*Fig. 16 Schematische weergave van het ARC/INFO-pakket*

In het kort kunnen de verschillende modules binnen het ARC/INFO-pakket als volgt worden beschreven:

- in ARC vinden alle algemene handelingen plaats die nodig zijn voor de opbouw en onderhoud van bestanden;
- INFO is de database van de GIS, hierin staan in de verschillende files de gegevens over de geografische elementen, zoals arcs, polygonen en tics, weergegeven in figuur 17;
- met ARCEdit kan men de gewenste veranderingen aanbrengen in een bepaalde coverage. Een coverage is een verzameling van objecten van een topografische kaart in digitale vorm (Van der Linden, 1990). Het is ook mogelijk om via ARCEdit, de database INFO te gebruiken. Tevens kan men via ARCEdit bestanden digitaliseren;
- met ARCPlot kan men coverages visualiseren door kleuren en symbolen te kiezen voor verschillende elementen als bijvoorbeeld punten, lijnen en vlakken. Tevens kan men via ARCPlot plotfiles aanmaken. De uitvoer van ARCPlot kan zowel naar scherm als naar een plotter;
- Arc Macro Language, AML, is de programmeertaal van ARC/INFO. Deze taal maakt het mogelijk om een commandofile te maken die men later in de batch kan laten uitvoeren;
- TIN is een module waarbinnen men drie dimensionale afbeeldingen en berekeningen kan maken;
- NETWORK is de module waarbinnen men afstanden kan berekenen tussen verschillende punten in een bestand.

Voor een gedetailleerde omschrijving van de mogelijkheden binnen een module wordt verwezen naar de gebruikershandleidingen voor iedere module apart (ESRI Inc., 1989). In deze Users Guides wordt de manier van invoeren van de verschillende commando's behandeld, waarna het commando omschreven wordt.



BUILD is dat het commando CLEAN ook de intersecties tussen de verschillende arcs berekent. Een intersectie is een kruispunt van lijnen waar geen node, knooppunt, aanwezig is (Van der Linden, 1990). Het programma CLEAN gebruikt twee parameters voor het bouwen van de topologie namelijk: dangle length en fuzzy tolerance. Bij het digitaliseren van lijnen die elkaar kruisen, T-splitsing, ontstaat er een dangle, een overlap. Deze overlap wordt automatisch verwijderd door het programma CLEAN als de dangle kleiner is dan de opgegeven dangle length. Tijdens het digitaliseren kunnen twee punten vlak bij elkaar worden gedigitaliseerd. Indien de afstand tussen deze twee punten kleiner is dan de fuzzy tolerance, voegt CLEAN deze punten samen tot één punt. De programma's CLEAN en BUILD moeten telkens gedraaid worden, wanneer de topologie veranderd is.

Voor het verwijderen van dangles langer dan de dangle length en het samenvoegen van nodes die verder uit elkaar liggen dan de fuzzy tolerance, wordt binnen ARC ARCEDIT aangeroepen. Binnen de module ARCEDIT is het mogelijk interactief veranderingen door te voeren in een bestand. Met het commando EDITCOVERAGE wordt aangegeven in welke cover veranderingen gaan plaatsvinden. EDITFEATURE geeft de klasse aan waar iets gaat veranderen, bijvoorbeeld arc, node of label. Met DRAWENVIRONMENT wordt bepaald wat van de EDITCOVERAGE op het scherm komt, bijvoorbeeld arc, node, en/of label. Na het commando DRAW wordt wat hiervoor is aangegeven, zichtbaar. Het is nu mogelijk om interactief in het bestand veranderingen door te voeren.

Wanneer de topologie opgeschoond is tot het gewenste resultaat, kan aan elk vlak, polygoon, een label worden toegekend. Met het commando CREATELABELS binnen ARC krijgt een ieder gesloten polygoon een apart labelnummer. Aan elk label kunnen oneindig veel kenmerken van die polygoon worden toebedeeld. Met ADDITEM wordt een nieuw item zonder gegevens toegevoegd. De vlakkenkaart kent één item, namelijk het vlaknummer, de bodemkaart kent twee items, namelijk de bodemsoort en de grondwatertrap. De gewaskaarten kennen ieder vier items:

- gewas (maïs of gras);
- hoogte van het gras;
- bedekkingsgraad van het gras;
- of het perceel al dan niet beregend is geweest.

Binnen ARCEDIT kan nu aan elk item een waarde worden toegekend. Aangezien straks de bestanden naar het beeldverwerkingssysteem ERDAS worden overgeheveld en ERDAS alleen met getallen overweg kan, zijn aan alle items getallen toegekend die een gegeven representeren. Door in ARCEDIT de klasse-label aan te geven, kunnen met de kruisdraden op het scherm labels worden geselecteerd. Na het selecteren van één of meerdere labels wordt met het commando CALCULATE aan een item een waarde toebedeeld. Voor de vlakkenkaart bestaat deze waarde uit een vlaknummer, gegeven op de vlakkenkaart van het waterwingebied Mander fase II, schaal 1 : 10 000 (Stoffelsen en Van Holst, 1985). De bodemsoorten en de grondwatertrappen die aanwezig zijn in het gebied, volgens de bodemkaart van het waterwingebied Mander fase II, schaal 1 : 10 000 (Stoffelsen en Van Holst, 1985), krijgen elk een aparte waarde toegekend. Bij de gewassenkaart wordt aan de hand van de in het veld geïnventariseerde kaarten een afzonderlijke waarde aan het item gewas toegekend:

- maïs;
- gras;
- achtergrond.

Alleen voor de labels met de waarde gras bij het item gewas worden verder gekenmerkt. Aan deze labels worden nog de items toegekend:

- bedekkingsgraad;
- hoogte van het gras;
- of het perceel al dan niet berekend is.

Aan deze items worden waarden toegekend voor een grotere of kleinere bedekkingsgraad dan 90 procent, of het gras korter is dan 5 centimeter, tussen de 5 en 15 centimeter is, of langer is dan 15 centimeter en of het perceel al dan niet berekend is.

De vlakkenkaart, bodemkaart en de gewassenkaarten zijn nu elk een afgeronde coverage, een verzameling van objecten van een topografische kaart in digitale vorm.

Voor het selecteren van beelden van de thermische video is het niet alleen belangrijk dat ze aan alle eisen voldoen, maar om de dynamiek in de tijd te bestuderen is het echter van belang dat een bepaald perceel aan deze eisen voldoet voor alle vluchtdagen. Met het commando UNION binnen de module ARC kunnen de coverages van de gewaskaarten op elkaar worden gelegd. Alle percelen die niet aan de gestelde voorwaarden voldoen, worden binnen ARCEDIT geselecteerd en krijgen allemaal hetzelfde item mee. Met het ARC commando DISSOLVE worden nu alle lijnen tussen aangrenzende polygonen met hetzelfde item verwijderd. Een coverage met polygonen blijft over, waarbij het mogelijk is om alle percelen aan te wijzen die voldaan hebben aan alle eisen voor de drie vluchtdagen. Figuur 9 toont een overzicht van de geschikte percelen voor verder onderzoek.



## AANHANGSEL 4

### OMZETTEN VAN ARC/INFO-FILES NAAR ERDAS-FILES

De gecreëerde ARC/INFO-files worden omgezet naar ERDAS-files. Binnen ERDAS worden berekeningen uitgevoerd die uiteindelijk resulteren in verdampingsbeelden. Binnen ARC/INFO is het mogelijk om deze omzetting te realiseren. De files die geconverteerd worden zijn:

- de vlakkenkaart;
- de bodemkaart;
- de grondwatertrappenkaart;
- de gewassenkaart;
- de verdampingsreductiekaart volgens MUST.

De gewassenkaart is er voor elke vluchtdag één en bevat alleen die percelen die aan alle gestelde eisen voldoen op die drie dagen, resumerend:

- bedekkingsgraad > 90%;
- niet beregend.

De drie verdampingsreductiekaarten voor zowel gras en maïs bevatten de berekende verdampingsreducties,  $1 - LE_{24} / LE_{24}^p$ , met het hydrologisch model MUST.

Het omzetten van de files kan worden bereikt in vier fasen. De eerste twee gebeuren binnen ARC/INFO, de laatste twee in ERDAS:

- het vergridden met POLYGRID;
- het omzetten naar ERDAS met SVFERDAS;
- het voorzien van een header met FIXHED;
- het omzetten naar een 4 of 8 byte-file met RECODE.

#### *vergridden met POLYGRID*

Het grootste verschil tussen een ARC/INFO-file en een ERDAS-file is dat een ARC/INFO-file vectorgericht is terwijl een ERDAS-file raster-georiënteerd is. Het vergridden van de ARC/INFO-covers gebeurt met POLYGRID. Bij het verrasteren zijn de invoergegevens nodig van:

- de x- en y-coördinaat van de linkeronderhoek van de linkerondergridcel;
- de breedte en de hoogte van de gridcel;
- het aantal rijen en kolommen.

De mapcoördinaten van een ERDAS-file hebben betrekking op het centrum van de linkerboven-pixel, terwijl de ARC/INFO vraagt om de linkeronderhoek van de linksonder-pixel. Bij de invoer behoort rekening te worden gehouden met een halve gridcel verschuiving. De grootte van een rastercel is 5 bij 5 meter. De grootte van het gebied Mander is bekend, waarna het aantal rijen en kolommen te bepalen is.

#### *omzetten naar ERDAS met SVFERDAS*

De verrasterde cover kan met SVFERDAS omgezet worden in een ERDAS-file. ARC/INFO heeft de mogelijkheid om meerdere items aan één pixel te hangen, ERDAS slechts één. Bij de conversie naar ERDAS dient aangegeven te worden waarop verrasterd moet worden.

Deze eerste twee fasen in ARC/INFO zijn weggeschreven in een macro onder de naam PGRID.AML (ontwikkeld door Olthof, DLO-Staring Centrum, 1990).

*voorzien van een header met FIXHED*

Om in ERDAS met deze files te werken, worden de files van een file header voorzien. Dit gebeurt met FIXHED. De file krijgt een header met daarin allerlei file-parameters zoals file-grootte, kaart- en databasecoördinaten, pixelgrootte. Bij het invoeren van de kaartcoördinaten dient rekening te worden gehouden met de kaartcoördinatenverplaatsing van een ARC/INFO-file naar een ERDAS-file. De in te voeren kaartcoördinaat komt met de kaartcoördinaat van ARC/INFO overeen door bij deze de helft van de celhoogte en het produkt van aantal rijen\_min\_1 en celhoogte op te tellen:

$$x_{ERDAS} = x_{ARC/INFO} \quad (9)$$

$$y_{ERDAS} = y_{ARC/INFO} + \frac{1}{2} \cdot y_{cel} + (aantal\ rijen - 1) \cdot y_{cel} \quad (10)$$

*omzetten naar een 4 of 8 byte-file met RECODE*

De files verkregen uit ARC/INFO zijn weggeschreven als een 16 byte-file. Om ruimte te besparen worden de files herschreven naar een kleinere file met RECODE. RECODE kent aan een file het aantal bytes toe afhankelijk van het aantal klassen die in die file voorkomen. Zo wordt een file met minder dan 16 klassen in een 4 byte-file weggeschreven en een file met minder dan 256 verschillende klassen in een 8 byte-file. Een tweede toepassing van RECODE is het toekennen van een beschrijving van iedere klasse. Dit blijkt erg praktisch te zijn als in een later stadium een legenda bij een afbeelding wordt geplaatst (aanhangsel 10).

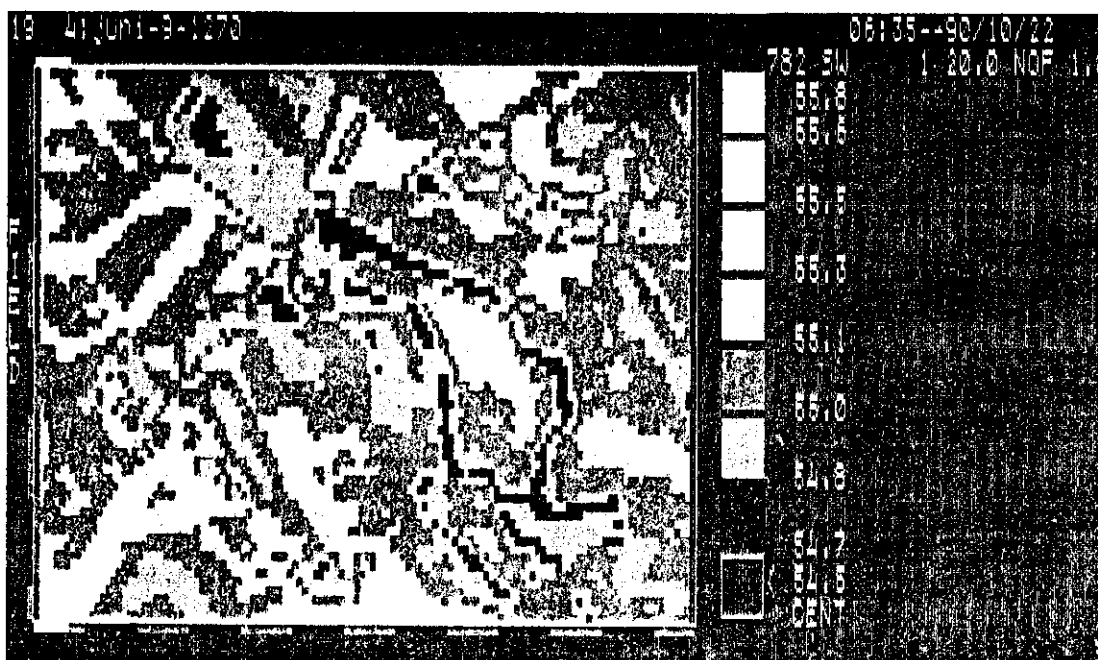
## AANHANGSEL 5

### HET DIGITALISEREN VAN THERMISCHE VIDEOBEELDEN EN DE OMZETTING NAAR ERDAS

Voor de opnamen is gebruik gemaakt van een thermische video. Hierdoor zijn veel beelden verkregen. Deze beelden kunnen niet allemaal geïnterpreteerd worden. Er dient een selectie gemaakt te worden van deze videobeelden. Voor de selectiecriteria die in dit onderzoek gehanteerd zijn, wordt verwezen naar paragraaf 4.3.1. Om interpretatie van thermische videobeelden mogelijk te maken moeten de thermische videobeelden gedigitaliseerd worden. Een voorbeeld van zo'n gedigitaliseerd thermisch beeld is weergegeven in figuur 18. De digitale waarden die variëren van 0 tot en met 255, worden per beeld in een file opgeslagen. Het format van deze files dient vervolgens aangepast te worden voor gebruik in ERDAS.

De thermische videobeelden, zoals opgenomen tijdens de verschillende vluchtdagen, zijn op VHS-banden opgenomen. Deze banden worden met een videorecorder afgespeeld. Het signaal van de videorecorder wordt via een verdeeldoos gestuurd naar een digitizer en een videodisplay. Deze display maakt deel uit van het AGA-systeem, en geeft de opgenomen beelden weer.

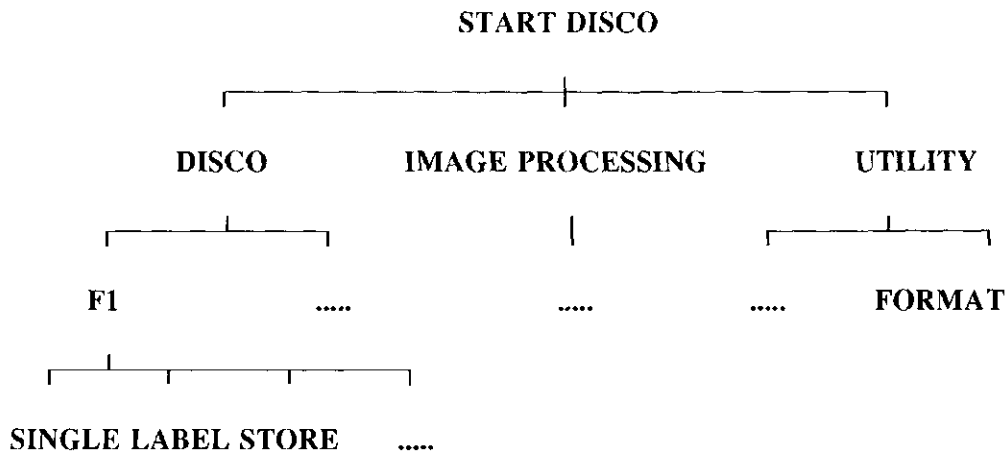
De digitizer is verbonden met de AGA-computer. Deze computer bezit naast een regulier toetsenbord 10 tiptoetsen. Deze tiptoetsen bevinden zich op de onderrand van het beeldscherm en dienen voor de besturing van het programma DISCO. Met het programma DISCO kan één warmtebeeld geanalyseerd worden. Ook kunnen veranderingen in het warmtebeeld worden aangebracht. Voor een uitgebreide beschrijving van dit programma wordt verwezen naar AGEMA infrared systems (1985).



*Fig. 18 Thermisch beeld gedigitaliseerd met het AGA-systeem*

Hieronder worden de handelingen beschreven, waarmee men één videobeeld selecteert:

- doe een diskette met het programma DISCO in de A-drive en start de AGA-computer;
- hierna kan gekozen worden uit verschillende menu's;
- ga een stap terug in het menu met de CAN-toets;
- de gehele AGA-computer kan gereset worden door de IPL-knop aan de zijkant van de computer te gebruiken.



- formatteer een diskette met **FORMAT** in drive B;
- speel de videoband af;
- selecteer het gedigitaliseerde beeld met **SINGLE**;
- **LABEL** het geselecteerde gedigitaliseerde beeld;
- **STORE** de digitale waarden op de diskette;
- ... mogelijkheden die nu niet gebruikt worden.

**Fig. 19 Het selecteren van gedigitaliseerde thermische videobeelden met het programma DISCO**

Het wordt sterk afgeraden de diskettes met AGA-format later weer voor andere doeleinden te gebruiken. Het is onmogelijk gebleken deze diskettes weer met MSDOS te formatteren of met de NORTON DISK DOCTOR te opereren.

Een nadeel van het AGA-systeem is dat telkens maar één beeld geanalyseerd en bewerkt kan worden, terwijl in dit onderzoek meer beelden centraal staan. Het ERDAS-systeem biedt deze mogelijkheid echter wel. De beelden die met het AGA-systeem geselecteerd en gedigitaliseerd worden, zijn in deze vorm niet bruikbaar in het ERDAS-systeem. Met het op het DLO-Staring Centrum gemaakte programma "disco" wordt het format aangepast. Het programma "disco" is op een diskette opgeslagen maar is niet hetzelfde programma als het programma DISCO waarmee de gedigitaliseerde beelden geselecteerd worden.

De beelden zijn nu geschikt voor bewerkingen binnen het ERDAS-systeem.

## AANHANGSEL 6

### HET OMZETTEN EN GEOMETRISCH CORRIGEREN VAN WARMTEBEELDEN VANUIT HET AGA-SYSTEEM BINNEN ERDAS

Het ERDAS-systeem, Earth Resource Data Analysis System, is opgebouwd uit modules en submodules, waarin de programma's staan gerangschikt. Een schematisch overzicht van een deel van het ERDAS-systeem is weergegeven in figuur 20. De belangrijkste modules met hun submodules worden hieronder in het kort beschreven:

- CORE is de module waarin standaardbewerkingen zijn opgenomen;
- IMAGE PROCESSING, IP, is de module waarin de remote sensing-beeldverwerking is opgenomen;
- GIS is de module waarbinnen kan worden gemanipuleerd met bijvoorbeeld verwerkte of geclassificeerde beelden;
- TAPES is de module die gebruikt wordt om data van tape in te lezen;
- SCALE HARD COPY is de module van waaruit een afdruk van een bepaald bestand kan worden gemaakt.

Voor een gedetailleerde omschrijving van elk van de commando's wordt verwezen naar ERDAS User's Guide (ERDAS, 1989). De handleiding van ERDAS is op dezelfde manier opgebouwd als het bovengenoemde schema, per module. Eerst worden er algemene zaken doorgenomen zoals installatie en onderhoud. Daarna staan op tabbladen de namen van de modules. Na ieder tabblad volgt een inhoudsopgave gevolgd door een algemene inleiding. Na de inleiding worden op alfabetische volgorde de verschillende programma's duidelijk toegelicht.

Om de warmtebeelden van het AGA-systeem om te zetten in bruikbare beelden voor beeldverwerkingssysteem ERDAS, zijn er stappen die doorlopen dienen te worden:

- aanmaken van een file header met FIXHED;
- geometrisch corrigeren en geografisch oriënteren van de beelden met GCPX, COORD2 en GCPERR;
- transformeren van pixelcoördinaten naar kaartcoördinaten met RECTIFY;
- koppelen van afzonderlijke warmtebeelden met STITCH.

#### *aanmaken van een file header met FIXHED*

De eerste stap om met het beeldverwerkingssysteem ERDAS te werken is door de verkregen originele warmtebeelden van het AGA-systeem te voorzien van een file header. Dit gebeurt met het commando FIXHED binnen de CORE-module. Met FIXHED wordt vastgelegd of het bestand een Image of een GIS-file is. Image files zijn files met de originele satelliet- of vliegtuigbeelden. Geografische Informatie Systeem bestanden zijn files met bewerkte remote sensing-beelden. Verder worden met FIXHED file parameters vastgelegd, zoals file-grootte, kaart- en databasecoördinaten en meeteenheid (aanhangsel 4).

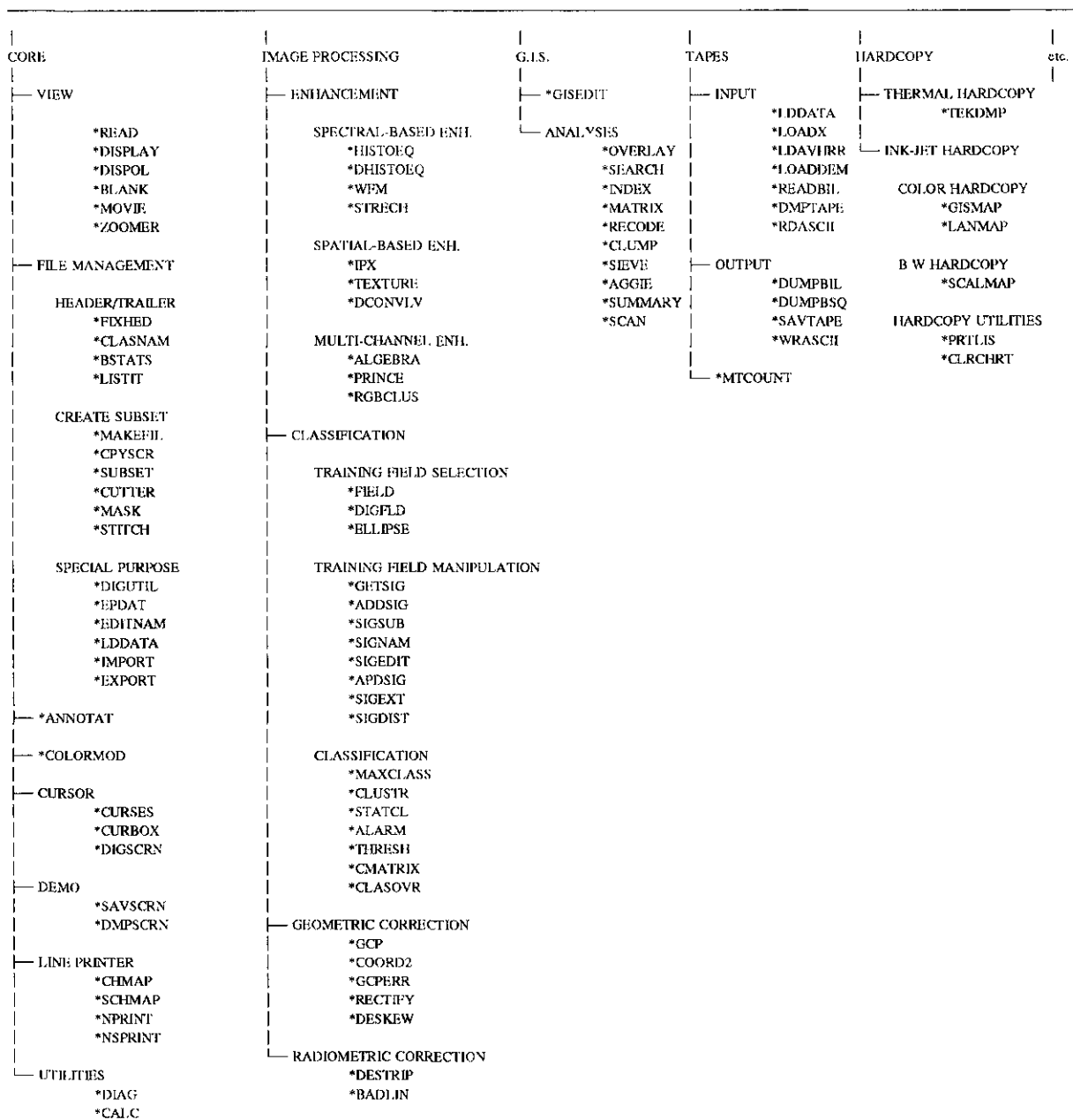


Fig. 20 Schematisch overzicht van de indeling van het ERDAS-systeem met zijn modules en submodules waarin de met \* programma's zijn

De warmtebeelden van het AGA-systeem zijn Image files. Het aantal kolommen van deze data file is 128 en het aantal rijen 64. De warmtebeelden hebben 1 band waarin is gemeten. De databasecoördinaten worden nog niet vastgelegd omdat deze niet bekend zijn. Wanneer het verkregen beeld geometrisch gecorrigeerd wordt, worden tevens de coördinaten aan de file toegevoegd. De data van het AGA-beeld is in 8-bit weggeschreven. Het kaarttype waarin gewerkt wordt is stereografisch. De celgrootte is het oppervlak dat één pixel vertegenwoordigt, gemeten in de kaartenheid en wordt voorlopig op 1 gesteld.

Nu de beelden van het AGA-systeem zijn omgezet in Image files is het mogelijk om met het CORE-commando READ het warmtebeeld op het scherm te visualiseren. Voor een GIS-dataset dient het commando DISPLAY te worden gebruikt.

#### *geografisch oriënteren van de beelden met GCPX, COORD2 en GCPERR*

Om de beelden geografisch te oriënteren is het IP-commando GCPX de eerste stap. Het commando maakt een file aan met daarin ground control points. Een ground control point vertegenwoordigt dezelfde positie in twee corresponderende datasets, zoals die van de topografische kaart en die van de Image file.

Met de muis van de computer worden op het scherm, waar het warmtebeeld is geprojecteerd, minimaal drie posities aangewezen. Er zijn minimaal drie posities nodig om het beeld eenduidig geografisch vast te leggen. De posities worden zoveel mogelijk over heel het scherm genomen om vervormingen te voorkomen. Deze plaatsen worden tevens op de topografische kaart van Nederland, blad 28E noord en blad 28F noord, schaal 1 : 10 000 (Topografische Dienst Nederland, 1987) aangestipt. De aangegeven plaatsen op de topografische kaart worden met ARC/INFO gedigitaliseerd tot een puntenbestand. Met het ARC-commando UNGENERATE wordt dit bestand omgezet in een ASCII-datafile. Met het in eigen beheer ontwikkelde programma POINT (aanhangsel 12) worden de coördinaten van de topografische kaart ingelezen in de GCPX-file waarin de posities van de Image file staan.

De coördinatentransformatie vindt plaats met COORD2. Dit programma berekent een transformatie-matrix om het beeld gelijk te richten tussen het coördinaten-systeem van de Image file en die van de ingebrachte coördinaten van de topografische kaart. COORD2 gebruikt de ground control points als input. De zes coëfficiënten van de matrix worden als volgt berekend:

$$x_{pixel} = b_1 + x_{map} \cdot b_2 + y_{map} \cdot b_3 \quad (11)$$

$$y_{pixel} = a_1 + x_{map} \cdot a_2 + y_{map} \cdot a_3 \quad (12)$$

COORD2 berekent deze coëfficiënten met de kleinste kwadraten methode. Verder berekent het programma de RMS-factor, root mean square, voor elk grond control point volgens:

- stel  $x_{act}$  en  $y_{act}$  zijn de data file coördinaten ingevoerd voor een ground control point;
- stel  $x_{map}$  en  $y_{map}$  zijn de kaartcoördinaten ingevoerd voor die ground control point;
- dan  $x_{comp}$  en  $y_{comp}$  zijn de berekende coördinaten van  $x_{map}$  en  $y_{map}$  gebruik makend van vergelijking (11) en (12).

De RMS-fout voor het grond control point wordt dan berekend met:

$$RMS = (x_{comp} - x_{act})^2 + (y_{comp} - y_{act})^2 \quad (13)$$

De RMS-factor is op 1,5 gesteld met het oog op de nauwkeurigheid. Als de som van de RMS-fouten voor alle ground control points groter is dan deze tolerantie, dan

elimineert het programma zelf het ground control point met de grootste RMS-fout. COORD2 herberekent de matrix-coëfficiënten net zolang totdat:

- de totale RMS-fout kleiner is dan de opgegeven tolerantie;
- het aantal ground control points te klein is voor de kleinste kwadraten methode.

In het laatste geval dienen nieuwe ground control points aan de dataset te worden toegevoegd of dient er een grotere tolerantie in de RMS-fout te worden geaccepteerd.

#### *transformeren van pixelcoördinaten naar kaartcoördinaten met RECTIFY*

De derde stap in het geografisch oriënteren van de beelden is het testen hoe nauwkeurig de matrix is voor alle ground control points. De gecreëerde files met GCPX en COORD2, waarin de ground control points en de coëfficiënt matrix staan, zijn de input voor GCPERR. GCPERR berekent de uiteindelijke Image pixel coördinaten van de ground control points getransformeerd door de matrix.

Uiteindelijk transformeert het IP-commando RECTIFY de coördinaten van de pixels naar kaartcoördinaten. RECTIFY is de laatste stap in het grafisch oriëntatie-proces. De berekeningen uitgevoerd door RECTIFY hebben tot gevolg dat de pixels opnieuw worden gerangschikt en dat de data worden geroteerd zodat de x- en y-richting van een pixel overeenkomen met de x- en y-richting van de topografische kaart.

De input voor RECTIFY bestaat uit de gecreëerde files, uit kaartcoördinaten van het meest links boven en rechts onder gelegen pixel en uit de grootte van de gridcel. De kaartcoördinaten worden interactief ingevoerd en zijn bepaald door voor elke file op zoek te gaan naar de grootste en kleinste x- en y-coördinaten van een ground control point en deze met 500 meter op te tellen dan wel af te trekken. Er van uitgaande dat een warmtebeeld 1 vierkante kilometer vertegenwoordigt en alle ground control points redelijk over het gebied zijn verdeeld is deze marge ruim genoeg om er voor te zorgen dat nadat RECTIFY zijn berekeningen heeft uitgevoerd, alle pixels in de nieuwe output file terug te vinden zijn. De pixel grootte op het warmtebeeld is 6 tot 7 meter. Voor de pixel grootte in het nieuwe Image bestand is gekozen voor 5 meter. Doordat voor een resolutie van 5 meter wordt gekozen, blijft de gedetailleerdheid van het beeld bewaard. Wanneer een grotere pixelgrootte wordt gekozen, krijgen de pixels gemiddelde waarden en is het verlies aan informatie groot. Bij het opnieuw rangschikken van de pixels is gebruik gemaakt van de Nearest Neighbor methode. Deze methode kent aan de nieuwe 5 bij 5 meter pixel de waarde toe die ook voorkomt in die pixel, waar de nieuwe pixel het meeste in ligt. Anderen methoden zijn Bilinear Interpolation en de Cubic Convolution. Deze algoritmen zijn nauwkeuriger dan de Nearest Neighbor methode, maar het nadeel is dat het gladstrijken van de gemiddelden leidt tot het produceren van een beeld dat in vergelijking vervaagt.

Ter controle om te zien of de warmtebeelden op de juiste wijze geometrisch zijn gecorrigeerd, geldt dat het beeld een vierkant moet zijn. Vier hoeken wijzen er op dat alle pixels in het nieuwe beeld zijn meegenomen en een vierkant duidt er op dat er geen vreemde vervormingen zijn opgetreden.

De harde achtergrondkaart van Mander, met daarop aangegeven de huizen, wegen en houtwallen, gemaakt in ARC/INFO kan met het ARC-commando UNGENERATE worden omgezet. UNGENERATE zet de coördinaten van het bestand om in een ASCII-file. Deze file kan binnen ERDAS met ARCDIG worden omgevormd tot een digitale ERDAS-file die gebruikt wordt als overlay ter oriëntatie.



### *koppelen van afzonderlijke warmtebeelden met STITCH*

Voor de drie maanden zijn er nu allemaal afzonderlijke warmtebeelden van het gehele gebied Mander. Om een file voor elke maand te krijgen bestaat er het CORE-commando STITCH. Dit programma legt de verschillende Image-files op elkaar en naait de files aan elkaar vast om slecht één Image file over te houden die de waarde bezit van de boven gelegen files. STITCH vraagt alle Image-files die tot één file worden gemaakt, afzonderlijk op. De eerst opgegeven Image-file verdwijnt onder de later opgegeven files. De best uitziende Image files dienen pas als laatste te worden opgegeven.

Na het koppelen van de afzonderlijke warmtebeelden, werd er in beeld steeds een naad zichtbaar tussen twee voormalige files. Deze hele naad had één en dezelfde waarde. Na onderzoek bleek dat bij het vastleggen van de AGA-beelden aan de linker- en rechterkant van het beeld een rand met waarden werd vastgelegd. Bij de omzetting naar een ERDAS-beeld is deze rand meegenomen. In het vervolg kan heel gemakkelijk met het ERDAS-commando GISEDIT, nadat de file binnen ERDAS is gehaald, aan beide zijde van het warmtebeeld de eerste kolom met waarden worden weggegooid. Dit bespaart later bij het koppelen van de warmtebeelden veel ongemak.

In dit stadium zijn er voor de drie maanden drie verschillende warmtebeelden beschikbaar voor ERDAS die:

- omgezet zijn vanuit het AGA-systeem naar ERDAS;
- geometrisch zijn gecorrigeerd;
- aaneen zijn gesmeed tot een warmteplaatje.

## AANHANGSEL 7

### BEPALING VAN DE RELATIE TUSSEN DE GEMETEN TEMPERATUREN IN HET VELD EN DE TEMPERATUREN VAN HET THERMISCH BEELD

Voor de omzetting van de waarden uit het thermisch beeld naar temperaturen in het veld, is het noodzakelijk de relatie te bepalen tussen deze twee. Volgens Thunnissen (1984) is er een lineaire relatie tussen de waarden van het thermisch beeld- en de oppervlakte-temperaturen.

Gedurende de drie vluchtdagen zijn in het gebied Mander op twee verschillende plaatsen grondtemperaturen gemeten met een infrarood-thermometer, type Heimans. Op een kaart in het veld is ingetekend waar bemeten is en welke temperaturen gemeten zijn. De data zijn uitgewerkt naar temperatuurgemiddelden met de bijbehorende standaardafwijkingen. Data, waarbij een standaard afwijking groter dan 1,5 graad berekend is, zijn nauwkeurig bekeken en temperaturen met een grote afwijkingen zijn uit de dataset gelaten.

Met het ERDAS-commando FIELD kunnen pixels worden geselecteerd door deze te omkaderen met een polygoon. Door op de veldkaart te kijken waar bemeten is, kan deze plaats met de muis op het beeldscherm met een polygoon worden omkaderd. Van de geselecteerde pixels wordt de gemiddelde pixelwaarde berekend, alsmede de standaardafwijking bepaald.

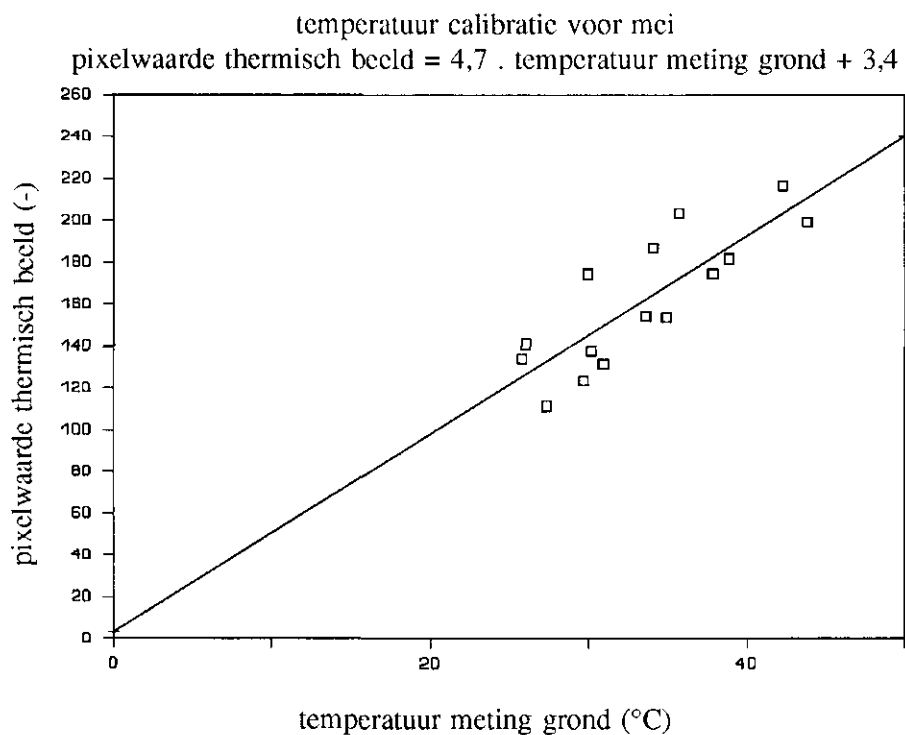
Doordat niet heel het proefgebied met de thermische video is opgenomen, is het niet mogelijk om van alle gewastemperaturen een pixelwaarde terug te vinden op het thermisch beeld. Zo is voor de bepaling van de relatie in juni slechts één van de twee plaatsen gebruikt waar de temperaturen in het veld zijn gemeten.

In praktijk is het zeer moeilijk om op het beeldscherm de aangegeven meetplaatsen te omkaderen met FIELD. De plaatsen waar de temperaturen in het veld gemeten zijn, dienen beter te worden weergegeven op de veldkaart en deze plaatsen behoren niet te dicht langs wegen of houtwallen te worden gemeten, maar op een groot homogeen ruim gelegen stuk land.

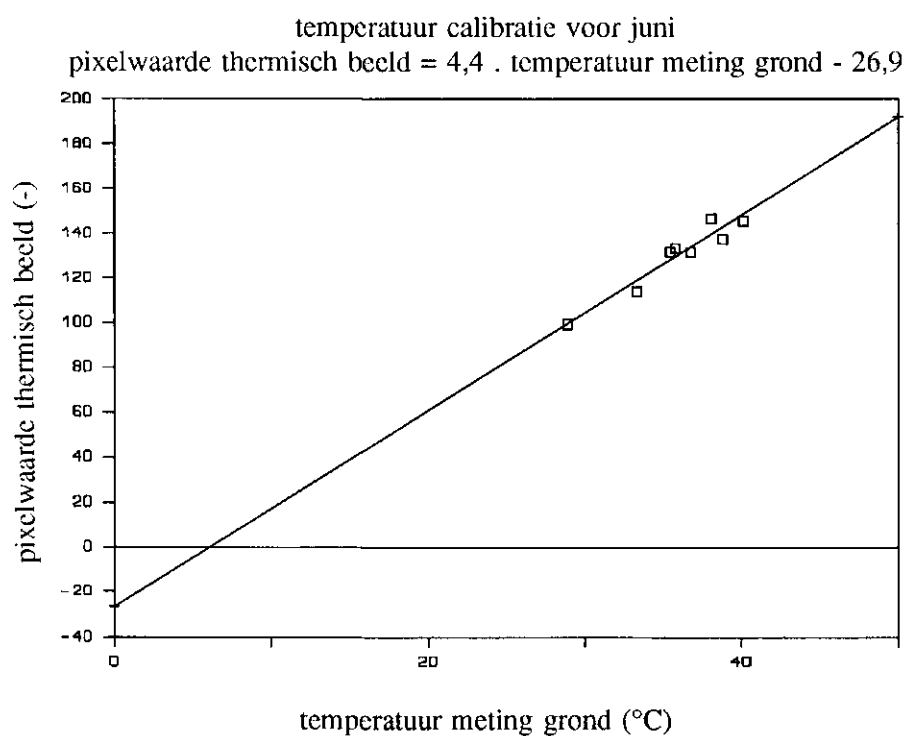
Met de kleinste kwadraten methode zijn voor de drie afzonderlijke vluchtdagen de regressielijnen bepaald door de pixelwaarden, verkregen uit het thermisch beeld, en de gemiddelde temperaturen in het veld zijn tegen elkaar uit te zetten. De regressielijnen zijn weergegeven in figuur 21 tot en met 23. De relatie en de correlatiecoëfficiënten van het thermisch beeld en de oppervlaktetemperatuur van de drie vluchtdagen zijn:

(mei)	$\text{thermisch beeld} = 4,7 \cdot \text{temperatuur meting grond} + 3,4$ correlatiecoëfficiënt = 0,84
(juni)	$\text{thermisch beeld} = 4,4 \cdot \text{temperatuur meting grond} - 26,9$ correlatiecoëfficiënt = 0,95
(juli)	$\text{thermisch beeld} = 4,3 \cdot \text{temperatuur meting grond} - 17,0$ correlatiecoëfficiënt = 0,77

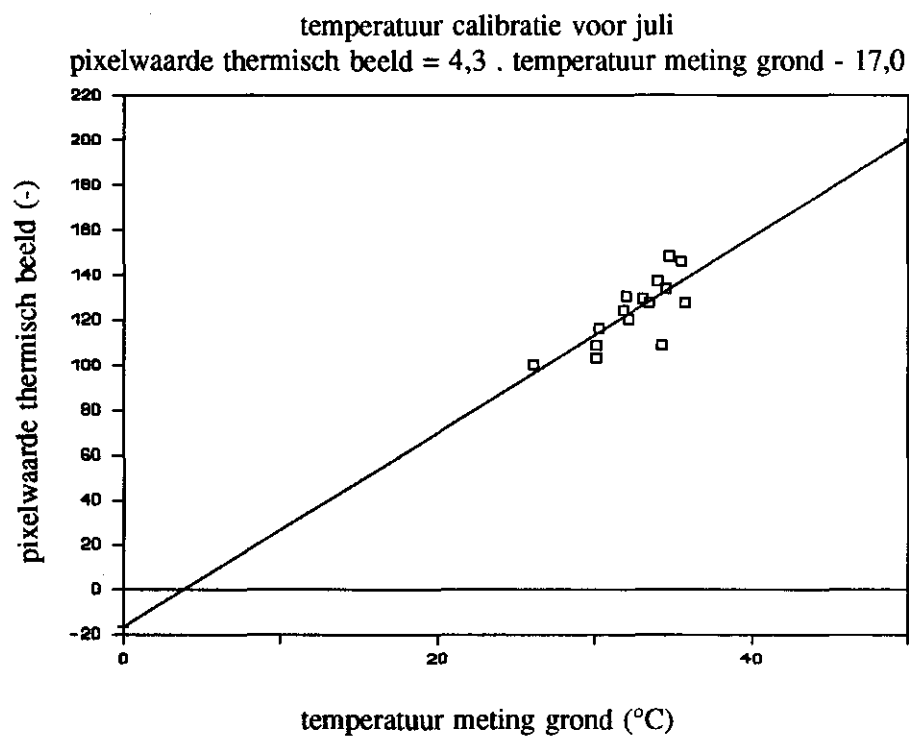
Om verdampingsbeelden te creëren in ERDAS worden de afzonderlijke relaties voor de daarbij behorende vluchtdagen gebruikt.



**Fig. 21** Regressielijn bepaald door de pixelwaarde van het thermisch beeld uit te zetten tegen de gemiddelde temperaturen in het veld in mei



**Fig. 22** Regressielijn bepaald door de pixelwaarde van het thermisch beeld uit te zetten tegen de gemiddelde temperaturen in het veld in juni



**Fig. 23 Regressielijn bepaald door de pixelwaarde van het thermisch beeld uit te zetten tegen de gemiddelde temperaturen in het veld in juli**

## AANHANGSEL 8

### TOELICHTING BIJ GEBRUIKTE POTENTIËLE GEWASVERDAMPINGSWAARDEN

Dit aanhangsel beschrijft hoe de gebruikte potentiële gewasverdampingswaarden zijn verkregen. Deze waarden zijn belangrijk voor de uitkomsten van de modelberekeningen, omdat ze als bovenrandvoorwaarde worden ingevoerd. De potentiële gewasverdamping kan met verschillende vergelijkingen verkregen worden. Deze vergelijkingen hebben verschillende invoerparameters. Het gevolg is dat er geen eenduidige waarde voor de potentiële gewasverdamping is aan te wijzen. Het is dan ook belangrijk aan te geven met welke benadering in het kader van dit onderzoek gewerkt is.

#### *berekening referentie gewasverdamping*

Per 1 april 1987 gebruikt het KNMI de Makkink-formule, vergelijking (14), in plaats van de Penman-formule, vergelijking (15), voor de routinematige bepaling van verdampingswaarden. De Makkink-formule is verkozen boven de Penman-formule, omdat de referentie gewasverdamping eenduidig is vast te stellen uit slechts twee meteorologische grootheden namelijk de globale straling en de luchttemperatuur. Hierdoor is te verwachten dat geen verwarring over de precieze betekenis van de referentie gewasverdamping zal ontstaan, zoals bij de Penman verdamping.

#### **Makkink**

$$\lambda E = C_1 \cdot \frac{s}{s + \gamma} \cdot K^\downarrow + C_2 \quad (14)$$

waarin:	$\lambda$	= specifieke verdampingswarmte van water	(J/kg)
	$E$	= evapotranspiratie	(kg/m <sup>2</sup> /s)
	$s$	= helling van de verzadigingsdampcurve	(mbar/K)
	$\gamma$	= psychrometerconstante	(mbar/K)
	$K^\downarrow$	= globale stralingsstroombichtheid	(W/m <sup>2</sup> )
	$C_1, C_2$	= constanten	(-)

#### **Penman**

$$\lambda E = \frac{s \cdot (Q^* - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot (e_s \cdot (T_a) - e_a) / r_a}{s + \gamma} \quad (15)$$

waarin:	$\lambda$	= specifieke verdampingswarmte van water	(J/kg)
	$E$	= evapotranspiratie	(kg/m <sup>2</sup> /s)
	$Q^*$	= netto stralingsstroombichtheid	(W/m <sup>2</sup> )
	$G$	= bodemwarmte stroombichtheid	(W/m <sup>2</sup> )
	$T_a$	= heersende temperatuur op waarnemingshoogte	(K)
	$\rho_a$	= dichtheid van lucht op waarnemingshoogte	(kg/m <sup>3</sup> )
	$c_p$	= specifieke warmte per eenheid massa van de lucht bij constante druk	(J/kg/K)
	$r_a$	= aërodynamische weerstand voor waterdamptransport	(s/m)

$s$	= helling van de verzadigingsdampcurve	(mbar/K)
$\gamma$	= psychrometerconstante	(mbar/K)
$e_a$	= dampdruk bij temperatuur $T_a$	(mbar)
$e_s$	= verzadigingsdampdruk	(mbar)

In veel publikaties wordt de Penman-formule benaderd door een functie van de windsnelheid. Vergelijking (15) wordt dan:

$$\lambda E = \frac{s \cdot (Q^* - G) + \gamma \cdot \lambda E_a}{s + \gamma} \quad (16)$$

waarin:

$$\lambda E_a = f(u) \cdot (e_s(T_a) - e_a) \quad (17)$$

met  $f(u)$  als een functie van de windsnelheid op 2 meter hoogte.

Voor de netto-straling in de Penman-formule levert problemen op. Deze grootheid wordt niet direct gemeten. Bovendien eisen de bestaande semi-empirische bepalingsmethoden van de netto-straling veel invoergegevens en bevatten zij veel empirische constanten die nog niet nauwkeurig bekend zijn. Vergelijking (14) lijkt zuiver empirisch, maar uit recent onderzoek is gebleken dat ook op fysische gronden met deze relatief eenvoudige vergelijking verdampingsgegevens worden verkregen die ongeveer gelijkwaardig zijn aan de resultaten berekend met Penman. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van dit onderzoek wordt verwezen naar De Bruin en Holtslag (1987). De conclusie van dat onderzoek is dat de evapotranspiratie van een goed van water voorzien kort gewas hoofdzakelijk wordt bepaald door de netto-straling en de luchttemperatuur. De laatste komt tot uiting in de grootheden  $s$ ,  $\gamma$  en  $\lambda$ . Gedurende het groeiseizoen blijkt voor gras in Nederland dat de netto-straling ongeveer gelijk is aan 0,5 maal de globale straling.

Uiteindelijk heeft het KNMI besloten de zogeheten gewasverdamping  $E_r$  in te voeren, welke als volgt is gedefinieerd:

$$E_r = C \cdot \frac{s}{s + \gamma} \cdot \frac{K^\downarrow}{\lambda} \quad (18)$$

waarin:  $C = 0.6$  (-)

Deze laatste formule wordt nu toegepast door het KNMI. Makkink stelt een formule met twee constanten voor, zie vergelijking (14). De keus voor het gebruik van  $C$  of  $C_1$  en  $C_2$  is arbitrair. De verandering in de constante(n) werkt direct door in de gewasfactor, zoals deze besproken zal worden in de volgende sectie.

#### *berekening potentiële gewasverdamping*

De werkelijke verdamping van een begroeid oppervlak, de evapotranspiratie  $E$ , kan worden beschouwd als de som van de verdamping en het interceptiewater,  $E_i$ , de

verdamping van de bodem,  $E_s$ , en de transpiratie via de huidmondjes en de cuticula van een droog blad oppervlak van een gewas,  $E_t$ , volgens:

$$E = E_i + E_s + E_t \quad (19)$$

Als er continu voldoende water aanwezig is voor evapotranspiratie, treedt de maximale verdamping op. Als zowel bladoppervlak als bodem vochtig zijn, gaat vergelijking (16) over in:

$$E_{\max} = E_i + E_{sp} + E_t \quad (20)$$

Het subscript p staat hier voor potentieel.

Als het gewasoppervlak droog is, is de interceptieverdamping gelijk aan nul ( $E_i = 0$ ). Bij nog steeds optimale watervoorziening van grondoppervlak en wortels, neemt de maximale evapotranspiratie af tot de potentiële evapotranspiratie,  $E_p (= E_{\max} - E_i)$ . Nu geldt:

$$E_p = E_{sp} + E_{tp} \quad (21)$$

Om op een eenvoudige manier de potentiële evapotranspiratie van een droog gewas te berekenen, kan de referentieverdamping,  $E_r$ , als maat voor de potentiële gewasverdamping genomen worden.  $E_r$  wordt met de vereenvoudigde Makkink-formule, vergelijking (18), bepaald. Nu is de potentiële gewasverdamping eenvoudig met een gewasfactor te berekenen:

$$E_p = f \cdot E_r \quad (22)$$

Hierin is  $f$  de gewasfactor. In tabel 10 worden de in dit onderzoek gehanteerde gewasfactoren weergegeven behorend bij de referentie-gewasverdamping,  $E_r$ , zoals berekend met vergelijking (18).

**Tabel 10** De gewasfactoren  $f$  van gras en maïs per decade per maand behorende bij de referentie-gewasverdamping  $E_r$  (TNO, 1988)

	maand april			mei			juni			juli			augustus			september		
decade	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
gras	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
maïs	-	-	-	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

## AANHANGSEL 9

### HET SCHATTEN VAN DE WINDSNELHEID BOVEN HET GEWAS

De windsnelheid wordt niet direct boven het gewas gemeten, maar op een naburig weerstation. Om de windsnelheid boven het gewas te bepalen wordt  $u(z_r+d)$  bepaald, de windsnelheid op een hoogte boven een gewas die overeenkomt met de windsnelheid boven een vlak open terrein begroeid met gras op hoogte  $z_r$  ten opzichte van de nulvlakverplaatsing  $d$ . Het schatten van de windsnelheid  $u(z_r+d)$ , op de hoogte  $(z_r+d)$  boven het aardoppervlak gebeurt met  $u_s(10)$ , die de windsnelheid op 10 meter hoogte is, gemeten op de vliegbasis Twente, volgens:

$$u(z_r + d) = c_u \cdot u_s(10) \quad (23)$$

waarin:

$u(z_r+d)$	= windsnelheid op hoogte $z_r+d$	(m/s)
$z_r$	= standaardhoogte boven $d$ ; algemeen $z_r = 2$ m	(m)
$d$	= nulvlakverplaatsing; algemeen $d = 0,7 \cdot$ gewashoogte	(m)
$c_u$	= correctiefactor	(-)
$u_s(10)$	= windsnelheid, op een naburig station op 10 m hoogte gemeten	(m/s)

Deze procedure is in grote lijnen ontleend aan het werk van Wieringa, onder meer beschreven in Wieringa en Rijkooft (1983).

Op de gemeten windsnelheid,  $u_s(10)$  wordt de beschuttingscorrectie van Wieringa (1976) toegepast. Op deze wijze wordt de potentiële windsnelheid,  $u_p$ , verkregen; dit is de fictieve windsnelheid die zou zijn waargenomen op 10 m hoogte, indien het omliggend terrein van het windstation vlak en open zou zijn, dat wil zeggen een ruwheidslengte van 0,03 m. De gemeten windsnelheid wordt gecorrigeerd voor de aanwezigheid van obstakels en dergelijke die zich in de directe nabijheid van het windstation bevinden. Er geldt de volgende relatie (Wieringa, 1983):

$$u_p = u_s(10) \cdot 0,764 \cdot \frac{\ln(60/z_{os})}{\ln(10/z_{os})} \quad (24)$$

waarin:

$u_p$	= potentiële windenergie	(m/s)
$z_{os}$	= de effectieve ruwheidslengte van het bovenwindse terrein	(m)

In het algemeen is de effectieve ruwheidslengte voor elke windrichting verschillend. In de praktijk ligt  $z_{os}$  meestal tussen 0,1 en 0,3 meter (Ad hoc groep verdamping, 1984).

Voor het weerstation Twente is de effectieve ruwheidslengte van het bovenwindse terrein niet gemeten. Indien het weerstation ideaal is, geldt er een effectieve ruwheidslengte van 0,03 meter. Dit is niet aannemelijk omdat rondom de vliegbasis bomen staan (mond. med. KNMI, 1990). Om de wind niet te veel te overschatten,



wordt bij het bepalen van de windsnelheid boven het gewas de effectieve ruwheidslengte op 0,1 meter gesteld.

Uit de potentiële windsnelheid wordt de windsnelheid,  $u(10+d)$ , boven het gewas ter hoogte van  $(10+d)$  bepaald. Voor deze windsnelheid geldt de relatie (Ad hoc groep verdamping, 1984):

$$u(10 + d) = 1,31 \cdot u_p \cdot \frac{\ln(10/z_o)}{\ln(60/z_o)} \quad (25)$$

waarin:  $u(10+d)$  = windsnelheid boven het gewas ter hoogte van  $(10+d)$  meter (m/s)  
 $z_o$  = ruwheidslengte (m)

Als laatste stap wordt  $u(z_r+d)$  bepaald, de windsnelheid boven het gewas op standaardhoogte  $z_r$  boven d.

$$u(z_r + d) = u(10 + d) \cdot \frac{\ln(z_r/z_o)}{\ln(10/z_o)} \quad (26)$$

In combinatie met vergelijking (25) leidt dit tot:

$$u(z_r + d) = u_p \cdot 1,31 \cdot \frac{\ln(z_r/z_o)}{\ln(60/z_o)} \quad (27)$$

De correctiefactor  $c_u$  uit vergelijking (23) wordt nu gedefinieerd als:

$$u(z_r + d) = u_p \cdot c_u \quad (28)$$

Uit vergelijking (27) volgt dan dat:

$$c_u = 1,31 \cdot \frac{\ln(z_r/z_o)}{\ln(60/z_o)} \quad (29)$$

De standaardhoogte waarop de windsnelheid bepaald wordt, is 2 meter. De waarden van de ruwheidshoogte  $z_o$  en de nulvlaksverplaatsing d voor gras en maïs worden berekend uit de gewashoogte H (Thunnissen, 1984);

(gras)	$z_o$	= 0,13 · H	d	= 0,63 · H
(maïs)	$z_o$	= 0,5 · H	d	= 0,63 · H

In het logboek van het DLO-Staring Centrum is gekeken wanneer er gevlogen is, gecorrigeerd voor Greenwich Mean Time, waarna uit de meteorologische gegevens

van het KNMI de windsnelheid bepaald kan worden. Tabel 11 geeft de gemeten windsnelheid op 10 meter hoogte, de potentiële windsnelheid, de correctiefactor als de windsnelheid op 2 meter boven de nulvlaksverplaatsing weer.

**Tabel 11** *Bepaling van de potentiële windsnelheid  $u_p$ , de correctiefactor  $c_u$  en de windsnelheid op 2 meter boven de nulvlaksverplaatsing  $u(2+d)$  uit de gemeten windsnelheid op 10 meter hoogte  $u_s(10)$*

vluchtdag	gewas	$u_s(10)$ (m/s)	$u_p$ (m/s)	$c_u$ (-)	$u(2+d)$ (m/s)
25-05-89	kort, middelhoog gras	3,0	3,2	0,78	2,7
	hoog gras			0,74	2,6
	maïs			0,52	1,8
19-06-89	kort, middelhoog gras	2,5	2,7	0,78	2,3
	hoog gras			0,74	2,2
	maïs			0,52	1,5
29-07-89	kort, middelhoog gras	3,5	3,7	0,78	2,7
	hoog gras			0,74	2,6
	maïs			0,52	1,8

## ERDAS PROGRAMMA'S ANNOTAT, BSTATS, COLORMOD EN GISMO

De temperatuur van een potentieel verdampend gewas  $T_c^*$  kan niet met één programma worden vastgesteld, omdat hiervoor geen eenduidige procedure voorhanden is (paragraaf 4.3.5). De waarde van  $T_c^*$  wordt vastgesteld met een soort "trail and error"-procedure. Door vlakken te sorteren waar volgens de grondwatertrappenkaart, de luchtfoto's en het eigen inzicht geen verdampingsreductie optreedt, kan voor een bepaald gewas een histogram gemaakt worden van alle pixelwaarden in deze verzameling. De waarde van  $T_c^*$  kan in dit histogram worden vastgesteld. Ook hiervoor zijn nog geen vastomlijnde criteria voorhanden. Gedacht kan worden aan het 10 procent-punt van de kansverdelingscurve. Met de gevonden waarden worden de verdampingsreducties berekend. Op het scherm kan hierna gekeken worden of de resultaten geaccepteerd worden of niet.

De volgende programma's worden binnen ERDAS gebruikt voor het bepalen van de  $T_c^*$ :

- GISMO voor het sorteren van de vlakken en het berekenen van de verdampingsreducties;
- BSTATS voor het berekenen van histogrammen;
- COLORMOD voor toekenning kleuren aan verschillende pixelwaarde (klassen);
- ANNOTAT voor het in beeld brengen van legenda's, titels.

Verder wordt gebruik gemaakt van de programma's DISPLAY en RECODE. Deze zijn programma's zijn reeds besproken in aanhangsel 4.

### *GISMO*

Binnen GISMO kunnen de pixelwaarden van verschillende files met elkaar vergeleken worden. Berekeningen kunnen per pixel worden uitgevoerd en nieuwe waarden kunnen worden toegekend. Hiervoor moet een soort programma geschreven worden. Dit programma kan binnen GISMO gemaakt en geëdit worden. Het gemaakte programma kan binnen GISMO bewaard worden. Een voorbeeld van een programma, geschreven binnen GISMO, wordt in figuur 24 afgebeeld.

### *BSTATS*

Binnen BSTATS wordt voor iedere onderscheidde klasse gesommeerd hoe vaak een bepaalde pixelwaarde binnen een opgegeven beeld voorkomt. Deze sommen worden weggeschreven naar een histogram. Dit histogram wordt opgeslagen in een file met de extensie .STA. In deze .STA-file wordt verder informatie opgeslagen over het gemiddelde, de standaard-deviatie, de mediaan, het minimum en het maximum.

DATA

INPUT pixel FILE "d:\disco\juli\juli";

INPUT gewas FILE "d:\disco\gewasjul";

OUTPUT tester FILE "d:\disco\juli\reductie";

START

tcster = CONDITIONAL {

((gewas EQ 1) AND (pixel GE 103)) 0.0790\*0.2326\*(pixel-103))\*100

((gewas EQ 2) AND (pixel GE 98)) 0.0964\*0.2326\*(pixel- 98))\*100

((gewas EQ 3) AND (pixel GE 92)) 0.0964\*0.2326\*(pixel- 92))\*100

((gewas EQ 4) AND (pixel GE 89)) 0.1900\*0.2326\*(pixel- 89))\*100

(default) 101};

END

*Fig. 24 Een voorbeeld van een programma binnen GISMO voor de berekening van de verdampingsreducties voor de maand juli*

#### *COLORMOD*

Binnen COLORMOD kunnen kleuren toegekend worden aan verschillende klassen binnen een bepaald beeld. Kleuren kunnen gemaakt worden door de drie basiskleuren rood, groen en blauw te mengen. Er kan ook gekozen worden uit kleuren die zijn opgeslagen in de zogenaamde color palette. Samengestelde kleurschema's kunnen bewaard worden in RAINBOW-files binnen het programma COLORMOD. In trailerfiles van GIS- en IMAGE-files kunnen de kleurschema's worden opgeslagen. Bij hernieuwd afbeelden van de beelden wordt dan direct het juiste kleurschema gebruikt.

#### *ANNOTAT*

Binnen ANNOTAT kunnen vectoren, polygonen, teksten, legenda's, gridlijnen en symbolen op het beeldscherm worden afgebeeld. De resultaten van deze zogenaamde overlay worden weggeschreven naar een file met de extensie .ANT. Elementen binnen deze .ANT-file kunnen eenvoudig worden geëdit. Als gewerkt wordt met een kleurschema (COLORMOD) dan dienen de resultaten weggeschreven te worden naar zogenaamde IMAGE-plane en niet naar de zogenaamde GRAPHICS-plane. Binnen de IMAGE-plane zijn de kleuren bekend die binnen een beeld voor de verschillende klassen gebruikt worden.

## AANHANGSEL 11

### DATAFILES

Er zijn in het gebied Mander veel gegevens verzameld die zijn opgeslagen in verschillende datafiles. Het rapport zou te dik worden als alle gebruikte data in dit rapport opgenomen zouden worden. Hieronder volgen de namen van de verschillende datafiles en zal een korte uitleg volgen over de inhoud. De files zijn opgeslagen op tape MANDER met het label MANDAT van het DLO-Staring Centrum.

FILENAAM	OMSCHRIJVING
- METEO.DAT	De neerslaggegevens (mm/dag) en de potentiële gewasverdamping (mm/dag) van gras, van 1 april tot en met 30 september 1989.
- METEO2.DAT	De neerslaggegevens (mm/dag) en de potentiële gewasverdamping (mm/dag) van maïs, van 1 april tot en met 30 september 1989.
- TWENTE.DAT	De neerslaggegevens (mm/dag), potentiële gewasverdamping van gras (mm/dag), de globale straling J/cm, de windsnelheden (m/uur) op de vluchtdagen.
- CORGRWST.DAT	Per kaartvlak: de referentie-peilbuis en de correctiegegevens voor de grondwaterstand.
- GRWSTMAN.DAT	Per peilbuis: de grondwaterstand (cm-mv.) per decade in 1989.
- GRWSTAND.DAT	Per peilbuis: de grondwaterstand (cm-mv.) van 1 april tot en met 30 september 1989.
- KAARTVLAK.DAT	Per kaartvlak: de grondsoort, de grondwatertrap, dikte wortelzone, het wortelzonetype, ondergrondtype, de voormalige GLG, GMG, GHG en de huidige GLG, GMG, GHG.
- WORTELZONE.DAT	De waterretentiecurven voor de verschillende wortelzone-typen.
- ONDERGROND.DAT	De waterretentiecurven en de stijghoogtekaracteristieken van de verschillende ondergrondmaterialen.

- ONGRDTYPE.DAT      Per ondergrondtype: de onderverdeling in lagen met daarbij de diepte van iedere laag beneden de onderkant van de wortelzone en het materiaal waaruit de betreffende laag bestaat.
- OPPERVLAKE.DAT      Per kaartvlak: de oppervlakte.
- PARAMETER.DAT      Kaartvlaknummer van het kaartvlak waarvoor een MUST-invoerfile gecreëerd moet worden.

---

**LABEL MANDAT**

---

## AANHANGSEL 12

### COMPUTERPROGRAMMA'S

Voor de bewerking van alle invoergegevens zijn programma's geschreven. Alle programma's zijn geschreven in FORTRAN-77. Het rapport zou te dik worden als alle gebruikte programma's opgenomen zouden worden. Hieronder volgen de namen van de verschillende programma's en een korte uitleg van de inhoud. De programma's zijn opgeslagen op tape MANDER met het label MANPRO van het DLO-Staring Centrum.

FILENAAM	OMSCHRIJVING en benodigde IN- en UITvoerfile(s).
- DAG.FOR	Zet grondwaterstanden, gemeten op decadebasis, om naar grondwaterstanden op dagbasis door middel van lineaire interpolatie. IN : GRWSTMAN89.DAT UIT : GRWSTAND.DAT
- KLASSE.FOR	De waarden in de file die gegenereerd zijn door het runnen van REDUCTIE.FOR, worden ingedeeld in een aantal klassen. Tevens wordt bepaald op hoeveel hectare en kaartvlakken het gewas potentieel, wel of niet, verdampt. IN : ERED(nummer dag).DAT of ERED(aantal dagen).DAG UIT : STATISTIEK.DAT
- MUST.FOR	Berekent de waterbeweging in de onverzadigde zone van bodem. Een pseudo-stationair hydrologisch model. Voor uitleg van dit model wordt verwezen naar De Laat (1985). IN : INV(nummer kaartvlak).DAT UIT : UITV(nummer kaartvlak).DAT
- POINT.FOR	Zet de topografische coördinaten op de juiste plaats in de GCP-files, zodat geometrische correctie mogelijk wordt (hulpmiddel bij de koppeling tussen ERDAS- en ARC/INFO-gegevens). IN : P(kenmerk).GCP UIT : P(kenmerk).GCP
- REDUCTIE.FOR	Selecteert per opgegeven dag de verdampingsreductie voor alle kaartvlakken. Het maximale aantal dagen is op 15 gesteld. IN : UITV(kaartvlak).DAT UIT : ERED(nummer dag).DAT of ERED(aantal dagen).DAG

- SELECT.FOR                      Stelt voor één kaartvlak een invoerfile voor MUST samen.  
IN            : CORGRWST.DAT  
              GRWSTAND.DAT  
              KAARTVLAK.DAT  
              METEO.DAT/METEO2.DAT  
              ONDERGROND.DAT  
              ONGRDTYPE.DAT  
              PARAMETER.DAT  
              WORTELZONE.DAT  
UIT          : INV(nummer kaartvlak).DAT
  
- TEKEN.FOR                      Maakt op eenvoudige wijze tekeningen van het grondwaterstandsverloop in één bepaald kaartvlak.  
IN            : UITV(nummer kaartvlak).DAT  
UIT          : TEKEN.DAT
  
- UITVOER.FOR                    Plaatst de uitvoer van een modelberekening met MUST in een file met een unieke naam.  
IN            : UITVOER.DAT  
UIT          : UITV(nummer kaartvlak).DAT

---

**LABEL MANPRO**

---